



TITLE:

帯水性砂質地盤における泥土圧シールド施工による切羽地山の挙動メカニズムに関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

高田, 正治

CITATION:

高田, 正治. 帯水性砂質地盤における泥土圧シールド施工による切羽地山の挙動メカニズムに関する研究. 京都大学, 2007, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2007-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12031>

RIGHT:

帯水性砂質地盤における泥土圧シールド施工に
よる切羽地山の挙動メカニズムに関する研究

平成 1 8 年 1 2 月

高 田 正 治

第 1 章

序 論

第 2 章

既往の研究による切羽周辺の地山挙動

第 3 章

泥土圧シールド工法における掘進管理と課題

第 4 章

切羽周辺地山の挙動

第 5 章

地山挙動のメカニズムを明確にするために
必要な追加検討

第 6 章

シールド切羽における応力バランスと
地山挙動のメカニズム

第 7 章

解明された地山挙動メカニズムの施工への反映

第 8 章

結 論

謝 辭

目 次

(ページ)

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	研究の目的と構成	2
第 2 章	既往の研究による切羽周辺の地山挙動	7
2.1	はじめに	7
2.2	既往の研究にみるシールド掘進に伴う地山挙動	7
2.2.1	一般的な地山挙動とその原因	8
	(1) シールド工法における地山変位の扱い	8
	(2) シールド施工に伴う地山挙動	9
2.2.2	泥水式シールドと泥土圧シールドにおける地山挙動の相違	22
2.3	地山の変位を抑制するための課題	23
第 3 章	泥土圧シールド工法における掘進管理と課題	26
3.1	はじめに	26
3.2	土圧式シールド工法の開発経緯	26
3.2.1	シールド工法の歴史	26
3.2.2	わが国におけるシールド工法の開発	27
3.2.3	泥水式シールド工法の特徴と課題	28
3.2.4	土圧式シールド工法の開発と特徴	29
	(1) 開発経緯	29
	(2) 多様な泥土圧シールド工法	30
3.3	施工における異常事象の発生	31
3.3.1	シールド施工におけるトラブルと課題	31
3.3.2	泥土圧シールド工法の掘進管理と課題	33
	(1) 掘進管理の基本	33
	(2) 掘進開始時の泥土圧の設定	34
	(3) 泥土圧の適切度の判断	34
	(4) 掘進開始時のチャンバー内充填と泥土性状の確保	35
	(5) 掘進管理の混乱の根幹	37
3.4	結論	38
第 4 章	切羽周辺地山の挙動	40
4.1	はじめに	40
4.2	分析対象トンネルの概要と施工管理	40
4.2.1	常磐道トンネル	40
4.2.2	つくばトンネル	42

4.2.3	南流山トンネル	45
4.2.4	瀬古トンネル	47
4.2.5	福島シールド	50
4.2.6	阪神シールド	51
4.3	地山挙動と掘進作用力	54
4.3.1	地山挙動計測	54
	(1) 各種計測機器の設置	54
	(2) 先行シールド施工時	54
	(3) 後行シールド施工時	58
	(4) 先行と後行施工時の間隙水圧変動とシールド直上の地表変位の比較	62
	(5) 周面摩擦の影響	64
	(6) 浸透力による地山の隆起について	65
4.3.2	地山挙動の基本	67
	(1) 作用力と地山変形についての基本認識	67
	(2) 掘進作用力と浸透作用を伴う地山の変形挙動	68
	(3) 課題	70
4.4	泥土	71
4.4.1	添加材	71
4.4.2	泥土の性質	73
4.4.3	泥土化	74
	(1) 軟弱粘性土と一般の粘土の場合	74
	(2) 添加材を加えて行う泥土化（砂・砂礫層の場合）	74
4.5	掘進時、掘進停止時のシールドから地山への作用	77
4.5.1	推進力の作用	77
4.5.2	ビット圧の作用とその作用環境	77
	(1) 掘進開始初期段階の掘進データによる分析	78
	(2) 鈴木の助言による分析によるビット圧	80
	(3) 加島らの実験	83
	(4) ビット圧の作用環境（地山とシールドの接触環境）について	84
	(5) ビット圧作用の本論文での取り扱い	87
4.5.3	添加材注入圧の作用	88
4.5.4	泥土圧の作用	90
4.6	掘進と停止に伴う地山挙動	91
4.6.1	掘進中の地山への水の移動、地山間隙水圧と地山変位	91
	(1) 地山への水の移動（地山への掘削土中水の排出）	91
	(2) 地山間隙水圧	96
	(3) 有効応力変化と地山変位	98
4.6.2	掘進停止に伴うシールドから地山への作用と地山挙動	102
	(1) 地山への作用の変化	102

	(2) 泥土圧低下と地山間隙水圧低下のメカニズム	103
	(3) 地山変位発生メカニズム	108
4.6.3	掘進停止中の作用力と地山挙動	111
	(1) 推進力作用による泥土圧および地山間隙水圧変動とそのメカニズム	111
	(2) 添加材注入による泥土圧および地山間隙水圧変動とそのメカニズム	116
4.7	結論	121
第5章	地山挙動のメカニズムを明確にするために必要な追加検討	125
5.1	はじめに	125
5.2	浸透流解析による地山間隙水圧変動過程の考察	125
5.2.1	浸透流解析の目的	125
5.2.2	周辺地山の間隙水圧の変動	125
5.2.3	解析手法	128
5.2.4	有限要素法による三次元浸透流解析	128
5.2.5	解析結果	131
5.2.6	計測値との照合と分析	131
5.2.7	カッター回転によるビット圧の間欠作用の検討	133
	(1) 作用力と変動	133
	(2) 三次元浸透流解析を用いた検討	134
	(3) 解析条件	134
	(4) 先行シールド外周位置での解析結果	135
	(5) 変動の有無による解析結果の比較	135
	(6) 変動排水圧力の前方への影響	136
	(7) 一次元の理論解と三次元解析の対比	136
5.2.8	まとめ	139
5.3	泥土化のプロセスと添加材の性質による泥土の性状	140
5.3.1	泥土化のプロセスと添加材の役割	140
5.3.2	泥土の物理特性から見た掘進停止時の泥土圧作用の変化	142
	(1) 泥土の機能と特性	142
	(2) 掘進停止に伴う泥土圧の低下挙動と泥土特性	143
5.3.3	全応力的な泥土圧を作用させる泥土と飽和軟弱粘性土から作られる泥土	147
	(1) 土水一体の特性と飽和軟弱粘土	148
	(2) 添加材注入が泥土化に必要な地盤の場合（砂・砂礫層の場合）	148
5.4	掘進停止後の地山から受ける圧力低下に連動した泥土圧の低下	150
5.4.1	瀬古 T（上飯田工区）における計測結果	150
5.4.2	常磐道 T における計測結果	152
5.5	結論	155

第 6 章	シールド切羽における応力バランスと地山挙動のメカニズム	156
6.1	はじめに	156
6.2	シールド掘進と地山挙動	156
6.2.1	掘進中の地山に対する力学的作用	157
	(1) 掘削	157
	(2) 推進力の作用	160
	(3) 添加材注入圧の作用	160
	(4) 排土	160
6.2.2	掘進停止中の地山に対する力学的作用	161
6.3	シールドからの作用と地山挙動の相互作用メカニズムに関する推論に対する考察	162
6.3.1	切羽における応力状態検討にあたっての仮定	162
	(1) 応力状態検討にあたっての条件	162
	(2) 簡略化のための掘進中のシールドから地山への作用と地山応力状態についての仮定	164
	(3) 地山の初期応力状態	166
	(4) 掘削開始前の初期応力状態における応力バランス	167
6.3.2	ビットによる理想的な地山切削時の局所的な応力バランス	167
	(1) ビットによる切削	167
	(2) ビットによる切削過程	168
6.3.3	マクロに見た切削時の切羽での応力状態の変化の詳細	172
6.3.4	地山切削時の添加材注入による切羽における応力バランス	173
	(1) 添加材の注入	174
	(2) 一般の掘削の場合	175
	(3) ビット部での添加材注入	175
	(4) マクロに見た添加材注入を伴う地山掘削時の応力バランス	179
	(5) フィッシュテール部からの添加材注入	180
	(6) 掘進中の応力バランスの検討の施工管理への反映	180
6.3.5	掘進停止中の応力バランス	181
	(1) 掘進停止直前の応力バランス	183
	(2) 掘進停止直後の応力バランス	183
	(3) 掘進停止後の応力バランス	185
	(4) 掘進停止中の添加材注入時の応力バランス	186
	(5) 掘進停止中の推進ジャッキによる加圧時の応力バランス	189
	(6) 応力バランス検討からの掘進停止中の添加材注入と推進ジャッキによる加圧の評価	190
6.4	瀬古 T (味鋤工区) における地山陥没時の掘進管理の検証	192
6.4.1	検証の目的	192
6.4.2	陥没発生前の掘進管理情報の状況	192

6.4.3	陥没発生に至る過程の分析	192
6.4.4	施工管理方法の応力バランスからの検証	195
6.5	結論と今後の課題	196
第7章	解明された地山挙動メカニズムの施工への反映	199
7.1	はじめに	199
7.2	良好な掘進状態を想定した地山への作用と地山挙動	199
7.2.1	掘進中のシールドの作用と地山挙動	199
7.2.2	掘進停止後のシールドの作用と地山挙動	201
7.2.3	掘進停止中のシールド側からの作用と地山挙動	202
7.3	良好な掘進状態を作るための掘進管理の鍵	203
7.3.1	良好な掘進状態を作るための要件	203
7.3.2	良好な掘進状態を作るための掘進管理の鍵	204
	(1) 掘進中の管理の鍵	204
	(2) 掘進停止中の管理の鍵	205
7.3.3	掘進管理上の重要事項	206
	(1) 泥土性状管理	206
	(2) 掘進速度管理	207
	(3) 泥土圧管理	208
	(4) 排土量管理	210
	(5) 地山間隙水圧測定を活用	212
7.4	掘進管理の全容とその他の掘進管理情報	212
7.4.1	掘進中の管理	212
7.4.2	掘進停止中の管理	214
7.4.3	その他の掘進管理情報の活用方法	215
7.5	具体的な施工管理	216
7.5.1	円滑な掘進管理の全容	216
7.5.2	泥土圧上昇時の掘進制御	218
7.6	掘進管理を考慮したマシンの装備について	221
7.6.1	泥土性状管理	221
7.6.2	泥土圧管理	221
7.6.3	排土量管理	222
7.6.4	その他	222
7.7	結論と今後の課題	226
第8章	結論	227
	謝辞	231

近年、シールド工法によるトンネル構築技術の開発・発展には目覚ましいものがある。

シールド工法は安全に、確実な施工を行うことが可能なことから、都市部における輻輳した地下空間でのトンネル構築法として、ますます重要なものとなってきている。

土圧式シールドは、掘削土を泥土化してカッターチャンバー内に充満させることから、地山の切削機構、掘削土を攪拌して泥土化させる混練機構、泥土の排土機構、泥土圧力制御機構等を備えており、掘削土を泥土化させるのに必要な添加材の注入装置の有無により、土圧シールドと泥土圧シールドとに区分される。

泥土圧シールド工法の一つである泥土加圧式シールド工法^{4)~6)}が1974年に発表されて以来、広くシールド工事の現場で用いられるようになり、最近の施工では、泥土圧シールド工法の大半は、泥土加圧式シールド工法が採用されている。

$$\begin{array}{l} \mathbb{V} \square \square \square \left\{ \begin{array}{l} \square \square \square \\ \square \Delta \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \square \square \\ \square \square \square \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \square \\ \square \square \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \square \square \square \\ \square \square \square \square \end{array} \right\} \end{array}$$

- 1 -

掘進とともにチャンバー内を移動して、チャンバー下部に設けたスクリーコンベヤーによって排土することにより施工が進められる。

泥土加圧式シールド工法に関する研究は、工法の開発当初から、掘削土の泥土化をいかに行うか、また、泥土はどのような性質を持っているかという観点から進められており、あわせて、泥土圧の設定と保持、添加材の選択と添加率、掘進データの分析と掘進管理へのフィードバックについて重点が置かれて研究されてきている^{7~14)}。しかしながら、シールド掘進と地山挙動の関係とこれに対する泥土の影響についての本質的な研究は、あまり行われていないように思われる。

これは、泥土圧シールド工法は切羽の安定を掘削土砂ではかるため、その地山安定機構への信頼性が泥水に比べて高いという実態を反映して施工が優先的に進められてきたためであり、切羽安定機構に対する研究は泥水シールドほどに重要視されていないのが現状と言える。

また、施工条件の厳しい場所での施工の良否にばらつきが生じたり¹⁵⁾、第三者に被害を及ぼす事態が発生した事例もあり、シールド機による地山の掘削と排土しながら加圧され、塑性流動化された泥土を介して、地山に対してどのような力学的作用を及ぼし、その作用に対して地山がどのような反応を示すかというシールド切羽における地山への作用と反作用のメカニズムが明確になっていないという課題がある。

このため、当工法が適用される事例は増加しているものの、その掘進管理は、施工経験を積み重ねた技術者による「職人技」と言われるように、理論的な施工管理手法の解明とその考え方の普及・定着が達成されていない原因にもなっている。

あわせて、図1-1に示すように、泥土圧シールド工法が始めて施工されて以降、切羽を安定させる機構や機械形式の差異により、様々な類似した工法の開発が行なわれてきたが^{9),16)~18)}、この開発過程における切羽安定に関する考え方の相異が、現在においても泥土圧シールドの施工管理技術を曖昧なものとする一因になっている。

1.2 研究の目的と構成

本研究では、洪積砂層で行われた泥土圧シールドの掘進と停止時におけるシールド機の制御情報と、切羽周辺地山における間隙水圧の変動、地山変位および近接シールドへの作用圧力等に関する詳細な現場計測結果をもとに、まずシールド機の地山への作用とこれに対する地山の反応を分析して、地山挙動のメカニズムを考察し、シールド施工時のシールド機と地山の相互作用のメカニズムを推察する。

つぎに、推察したシールド機と地山との相互作用力の発生メカニズムを踏まえて、チャンバー内泥土の機能・所要の性状の考察と合わせて、切羽におけるシールド側と地山側の応力バランスを有効応力の原理をもとに考察し、推察を検証するとともに、帯水砂質地盤における掘進管理のあるべき考え方を明らかにする。

シールド施工時に発生する地山の変形や間隙水圧の変動は、シールド施工時の掘進管理と密接な関係を有しており、切羽付近における応力バランスとメカニズムを明らかにすることは、シールド施工における円滑な掘進管理の実現にとって重要な事項であると考えられる。

本研究の構成は下記の通りである。

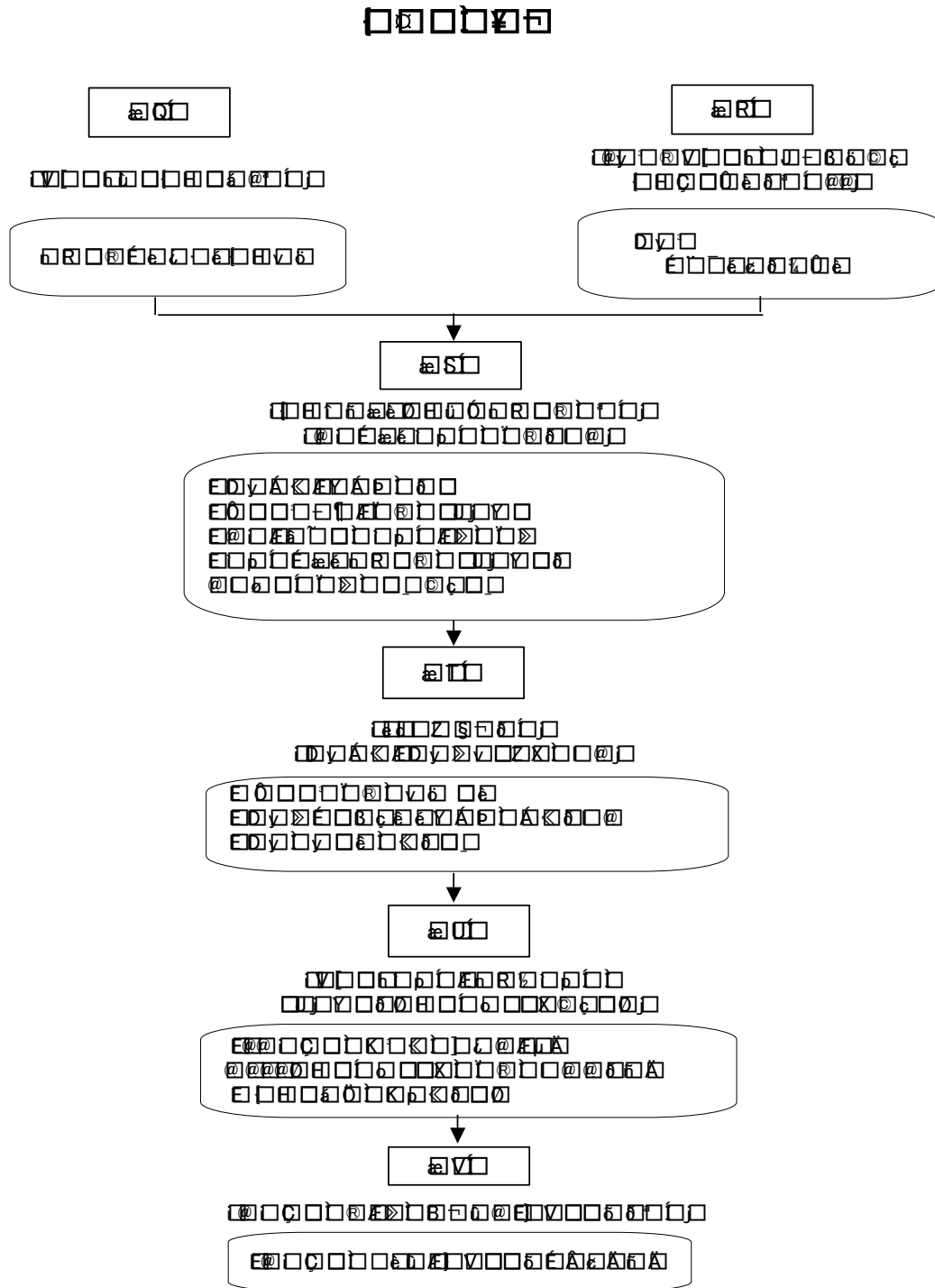


図 1-2 本研究の構成

第2章では、既往の施工と研究から見たシールド施工に伴う掘進情報と地山挙動に関する知見を、土圧式工法と泥水式工法との対比を含めて整理し、地山の変位に影響を及ぼす施工上の要因を明らかにするとともに、泥土圧シールド工法の掘進管理において未解明となっている課題を明らかにする。

第3章では、まず、シールド工法の開発と発展過程をたどることにより、土圧式シールド工法に内在する課題について概括する。次に既往の泥土圧シールド工法に関する一般的な施工管理の手順を示す。さらに、多年にわたって本工法が採用され、施工されてきているにもかかわらず、掘進管理の考え方に未解明で曖昧なままとなっている課題が存在していることと、その理由を整理し、解明するための研究が必要なことを示す。

第4章では、まず本論文での掘進情報等に関する分析に用いる泥土圧シールド工法による工事を主とした施工事例の概要について示す。

つぎに、泥土圧シールド工法の基本を構成する泥土について、求められる性質、泥土化の意味、注入される添加材の役割に関する基本認識について整理する。

さらに、泥土圧シールドの掘進と停止および停止の継続に伴う地山への作用力とその変動について、地山計測と掘進管理情報により考察するとともに、作用力の変動に応じて生じる地山挙動の発生メカニズムについて有効応力の変動の視点から推論する。

あわせて、それらの考察から得られた成果として、泥土は地山に対して全応力的な作用を及ぼしているとの考え方について述べる。

第5章では、まず、泥土圧シールド施工に伴い地山間隙水圧が変動するメカニズムに関して、その発生要因を検証するため、三次元有限要素法浸透流解析を行う。それにより地山への排水、過剰間隙水圧の発生と停止に伴う消散の過程を確認する。

次に、泥土化のプロセスを基に、良質な泥土化を図るために添加材が果たす役割と添加材に求められる物理特性について考察するとともに、掘進の停止に伴い泥土圧が低下変動を示すこと、及びその低下傾向が用いる添加材による泥土の性状により差異を生じることについて考察する。

さらに、全応力的作用を及ぼす泥土は、土水一体性を有することが必要であることを推論する。

第6章では、泥土圧シールド工法における施工時の切羽における応力バランスについて、第4章、第5章で示した現場観察と計測結果をもとに有効応力の原理に基づき、シールド掘進中の地山切削、推進、切削土取込み、添加材注入の各過程における状態変化と掘進停止中の状態変化について考察する。

さらに、この切羽応力バランスを視点とする切羽状態の分析手法に基づいて、掘進停止

中の泥土圧維持を目的に実施される対応策の適否と陥没事故発生事例の掘進管理状況の評価への適用性を検証する。

この結果、掘進時の地山切削と推進、および停止時において、有効応力の原理による応力バランスの状態変化に伴い地山が挙動しているとの考察に基づくと、シールドからの作用の載荷と除荷に伴う地山の挙動を矛盾なく説明できることを明らかにする。

第7章では、前章までの検討により得られた知見により、泥土圧シールドの施工における掘進管理の鍵を整理し、その鍵を達成するための掘進管理のあり方とその管理を実現するために必要とするマシン装備についての考え方を提案する。

第8章では、結論として得られた知見を整理し、更なる研究課題についてまとめる。

泥土圧シールド工法の掘進管理技術は職人技と言われながらも、この工法は広範囲に適用されてきており、今後も様々な形態の施工方法の開発が続くものと考えられる。

したがって、本研究の成果により、泥土圧シールド工法による施工に際して、切羽におけるシールド機と地山との相互作用の複雑なメカニズムとその理論が容易に理解しうるものとなり、安全で安定した施工管理の実現につながるものとする。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド編)・同解説，2006.7
- 2) 日本鉄道建設公団：シールドトンネル設計施工指針(案)，1999.8
- 3) 塚田章ほか：シールド工法の実際，鹿島出版会，1980.11
- 4) 加島豊ほか：泥土加圧シールド工法の紹介と実績，トンネルと地下，第8巻7号，1977.7
- 5) 佐々木道雄：土圧系シールド工法，pp.8-14，鹿島出版会，1982.7
- 6) 加島豊：最近の土圧系シールド・泥土加圧シールド工法一切羽安定に関する2，3の考察，日本プロジェクトリサーチ，pp.39～57，1984.4
- 7) 末岡徹ほか：土圧バランス型シールド機械内の砂の流動特性について，大成建設技術研究所報第15号，1982
- 8) 吉川忠男ほか：シールド掘進機の検討(その4)，日立造船技術研究所報，1981
- 9) 栗原宏武，石谷尹利，玉井達郎，竹内利彦：帯水砂・砂礫層を対象とした土圧シールド工法の開発研究(その2)，鹿島建設技術研究所年報第31号，pp.151～158，1983
- 10) 西尾誠高，気仙哲夫：加泥型土圧シールド工法における添加材の配合と効果，間組研究年報，pp.65～78，1985
- 11) 中本博次ほか：土圧系シールドにおける添加材の配合計画について，五洋建設技術研究所報，Vol. 14，1985
- 12) 久保田五十一ほか：土圧系シールドの施工データ解析(その1)，前田建設技術研究所報 Vol. 28，1987
- 13) 阿部和毅，石田喜久雄：泥土圧シールドの切羽安定の研究(その1)，三井建設技術研究所報 No. 18，1993
- 14) 齋藤優，山田清臣：泥土圧シールド工法における掘削礫質土の土性改良，土木学会論文集VI，pp.75～87，1998
- 15) 日本鉄道建設公団名古屋建設局ほか：上飯田連絡線 瀬古T(シールド)施工報告書，2001
- 16) 松島寛：泥しょう加圧シールドへのアプローチ，トンネルと地下，第12巻9号，1981.9
- 17) 吉田弘明，斉藤優：気泡泥漿シールド模型実験(その2)，銭高組技術研究所報，No. 16. 1991
- 18) 羽生田吉也，藤原紀夫：気泡シールド工法の開発，大林組技術研究所報 No45，pp.29-32，1992

第2章 既往の研究による切羽周辺の地山挙動

2.1 はじめに

シールド施工時に生じる地山挙動には、主として地山の変位と水の移動（水圧の変化）があり、それらの特性は、土質力学によれば、砂・粘土など地山材料特性に大きく依存すると考えられる。

既存のシールド施工時の現場計測や研究¹⁾では、地山の変位が切羽前方での隆起～沈下、切羽通過からマシン通過までの間の沈下、テールボイド通過時の沈下と裏込注入時の隆起、シールド通過後の沈下があることが示されている。

一方、シールド施工時の地山の間隙水圧の変動については、シールド接近時の間隙水圧の上昇、掘進停止時の復元が知られており、この上昇、復元の繰り返しにより、間隙水圧上昇のピーク値が繰り返し回数増加と繰り返しの時間間隔の短縮により増加することがわかっている²⁾。

しかしながら、これまでの現場計測や既存の研究としては、主に泥水式シールドを対象としたものが多く、泥水式シールド工法と切羽掘削時の地山安定に用いる材料や排土機構が全く異なる土圧式シールド工法の切羽安定メカニズムについての研究や報告はほとんど見受けられない。

本章では、シールド掘進に伴う地山挙動に関する既往の研究成果を、地山条件の相違、施工過程の観点から、地山の変位発生メカニズムと施工因子、現状の技術課題について整理する。また、泥水式シールド工法と土圧式シールド工法の相違を示すとともに、土圧式シールド工法における切羽安定メカニズムを解明することの必要性について言及する。

2.2 既往の研究にみるシールド掘進に伴う地山挙動

わが国におけるシールド工法は、開削工法と比べて周辺地域の生活環境や交通環境などの社会環境に対する影響が少ないという特長を活かし、1965(昭和40)年頃から都市部におけるトンネル工事の有力な工法として急速に普及・発展してきた³⁾。しかも現在では、従来の円形トンネル以外の多様な断面や特殊施工条件下にもその適用範囲が拡大している。これは、密閉型シールド機の開発からシールド機の掘進制御技術、セグメントの組立技術の確立、あるいは高品質で合理的なセグメントの開発等、シールドトンネルの品質向上に関わる各種の技術開発の成果³⁾が結実した結果であると考えられる。

シールド掘進に伴う周辺地山の変位は、当初の手掘り式・ブラインド式の開放型シールドから、現在の土圧式・泥水式の密閉型シールドに移行するに伴い、切羽安定技術のみならず裏込め注入やシールド機の姿勢制御技術の向上により、大幅に低減されるようになってきている。

2.2.1 一般的な地山挙動とその原因

(1) シールド工法における地山変位の扱い⁴⁾

「トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説」では、昭和52年版から平成18年版までの約30年間のうちで、地山の変位に係わる条文及び解説の記載内容に次の4点（内容的には2点）の大きな変遷が行われている（表2-1）。

①昭和52、61年版で「地盤沈下」としていた内容を平成8年版では隆起も含めた「地盤変位」として表現している。

②現在の一般的な解釈となっているシールド掘進に伴う5種類の地盤変位分類は、平成8年版からの解説（図2-1、表2-2参照）で示されたものであり、それ以前の版では「先行沈下」と「後続沈下」の2区分で解説している。

表2-1 「トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説」

での地盤変位記載事項の変遷^{3)に加筆}

		昭和52年版	昭和61年版	平成8年版	平成18年版
条 文	地盤変位の表現	地盤沈下		地盤変位	地盤変位
	地盤変位発生要因	・地盤条件 ・掘削方法 ・山留め方法 ・裏込め注工	・地盤条件 ・シールド形式 ・掘削方法 ・切羽安定機構 ・推進工法 ・裏込め注工	・計画・設計、施工条件 ・地盤条件 ・施工条件	・計画・設計、施工条件 ・地盤条件 ・施工条件
	施工上の留意点	・適切な方法を選択	・適切な工法の採用 ・慎重な管理	・適切な工法の採用 ・慎重な施工管理	・適切な工法の採用 ・慎重な施工管理
	施工上の努力目標	・地盤沈下を少なくするように努める	・地盤沈下を少なくするように努める	・地盤変位を極力少なくするように努める	・周辺への影響を極力少なくするように努める
解説文	地盤変位課題に対する基本方針	・完全な変位回避は難しいが小さくできる	・完全な変位回避は難しいが小さくできる	・最小限に抑えることが可能	・最小限に抑えることが可能
	地盤変位発生メカニズムの解説	——	・6種類のメカニズムで解説	・5種類のメカニズムで解説	・5種類のメカニズムで解説
	地盤変位挙動の解説	・シールド掘進に伴って生じる地盤変位を「先行沈下」と「後続沈下」の2区分で解説 ・「先行沈下」の解説で、一部、隆起についても触れている（土被りの小さいブラインドシールドの場合を例示している）。	・掘進に伴う地盤変位を5段階で区分し解説 ・沈下のみならず隆起も含めて解説	・掘進に伴う地盤変位を5段階で区分し解説 ・沈下のみならず隆起も含めて解説	・掘進に伴う地盤変位を5段階で区分し解説 ・沈下のみならず隆起も含めて解説
	地盤変位予測の解説	（事前予測に関する記載なし）	・過去の実績に基づく沈下量の予測解説（ただし、有限要素法は特例扱い）	・管理基準値設定のための事前予測の実施を明記 ・有限要素法の使用も通常作業扱い	・管理基準値設定のための事前予測の実施を明記 ・有限要素法の使用も通常作業扱い
	地盤変位防止策の解説	——	・5種類の防止策を解説（圧気工法に対する記述を含めている）	・5種類の防止策を解説（圧気工法の記述がなくなる）	・5種類の防止策を解説（圧気工法の記述はなし）
解説図	——	——	・地表面沈下の横断面図	・シールド推進による地盤変位の分類（トンネル縦断方向）（図2-1参照）	・シールド推進による地盤変位の分類（トンネル縦断方向）（図2-1参照）

※ 下線部は主な改訂部分

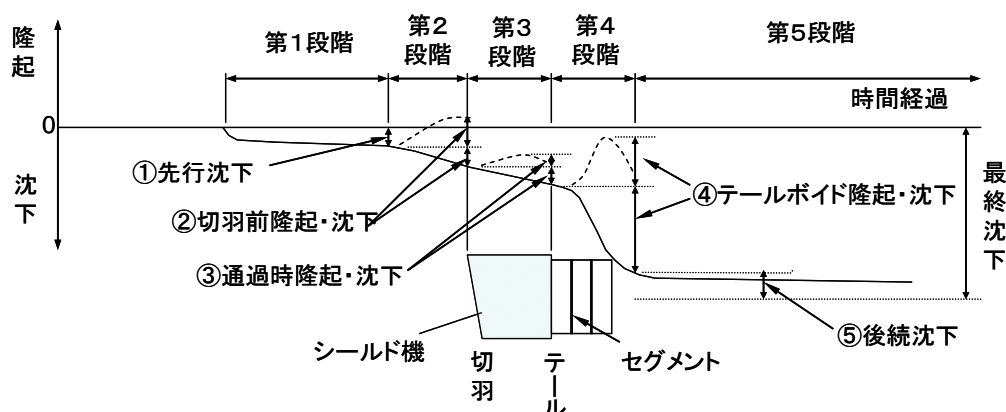


図 2-1 シールド掘進に伴う地盤変位の分類

表 2-2 地盤変位のメカニズム⁵⁾

地盤変位の種類	原因	地盤状況の変化	変状メカニズム
①先行沈下	地下水低下	有効土被り圧の増加	圧縮・圧密沈下
②切羽前隆起沈下	切羽崩壊、過大な取込み、切羽押込み	地山の応力解放、乱れ、土水圧の不均衡	応力変化に伴う変形、破壊
③通過時隆起沈下	余掘りの変形、シールド外周面と地山の摩擦、シールド機の姿勢	地山の応力解放、乱れ	応力変化に伴う変形、圧縮
④テールボイド隆起沈下	テールボイドの発生、注入量・注入圧の過不足	地山の応力解放、乱れ、土水圧の不均衡	応力変化に伴う変形、破壊
⑤後続沈下	上記全要因	——	主に上記残留分

③シールド施工にあたっての留意点は、版を改訂するごとに具体的表現となり、平成 8 年版では「適正な工法選定」と「慎重な施工管理」により地盤変位を極力少なく、最小限に抑えることを基本として謳い、平成 18 年版の条文からは、「地盤変位」の部分で「周辺への影響」と更に具体的表現で示している。

④地盤変位予測の解析では、昭和 52 年版には「事前予測」に関する記載はない。昭和 61 年版から新たな項目立てをして、とくに過去の実績などに基づく沈下量の予測について記載されている。また、平成 8 年版からは、施工時の管理基準値を定める目的として、地盤変位の事前予測を明記し、その際に有限要素法の使用も一般的な手法の一つとして記載されている。

(2) シールド施工に伴う地山挙動

シールドトンネルの施工過程は、シールド機前面の切羽部で地山を掘削し、掘進終了後、シールド機後部のテール内で、数ピースのセグメントをボルト等で締結しながら、リング状に組み立てる。この組み立てられたセグメントを反力とし、シールド機を推進すると同時に、セグメントリングをシールド機テール部から地山へ脱出させる。

テール脱出の際には、地山とセグメント覆工間に生じるテールボイドに裏込め注入材を加圧・充填（同時裏込め注入の場合）する。このシールド掘進、裏込め、セグメント組立

の繰返し施工によって、連続したセグメントの覆工体、すなわちシールドトンネルを構築するものである。なお、テール脱出後のセグメント覆工は、裏込め注入材が固化し、ある程度の強度が発現して、初めて地盤と一体化した安定状態に至る。

シールド掘進に伴う地山挙動は、切羽での地山掘削からセグメントを組立て、これが裏込め材を介して地山と一体化するまでの間で、掘削による応力解放やシールド機の引きずり、裏込め注入圧作用等により、地山に緩みや乱れが生じて変位や変形が発生することである。シールド機の切羽通過からテール通過までの施工プロセスは、地山から見れば、主にその地山応力が掘削によって解放される事象であると考えられる。密閉型シールドでは、この解放される地山応力に相当する圧力を切羽およびテールボイド部に作用させ地山応力とバランスさせることで、掘進、セグメントの組立、裏込め注入によりトンネルを構築するものである。しかし、掘削に伴う解放応力に対し、切羽圧や裏込め注入圧を地山に作用させても、両者の応力を完全に一致させることは難しい。その結果、トンネル周辺地山での地山応力が変化し、変位や変形が発生することになる。更に地山挙動は、シールド機外径、土被り、トンネル線形、地盤構成、地下水位などの現場条件とシールド形式、裏込め注入の形式、掘進管理方法、補助工法の採用などの施工条件が複雑に関連し合って発生するものと考えられる。

シールド掘進に伴う地山変位要因の概念図を図2-2に示すとともに、これまでの研究によって明らかとなっている地山の挙動を施工プロセスに沿って、以下に述べる。

(a) 第一段階 先行沈下

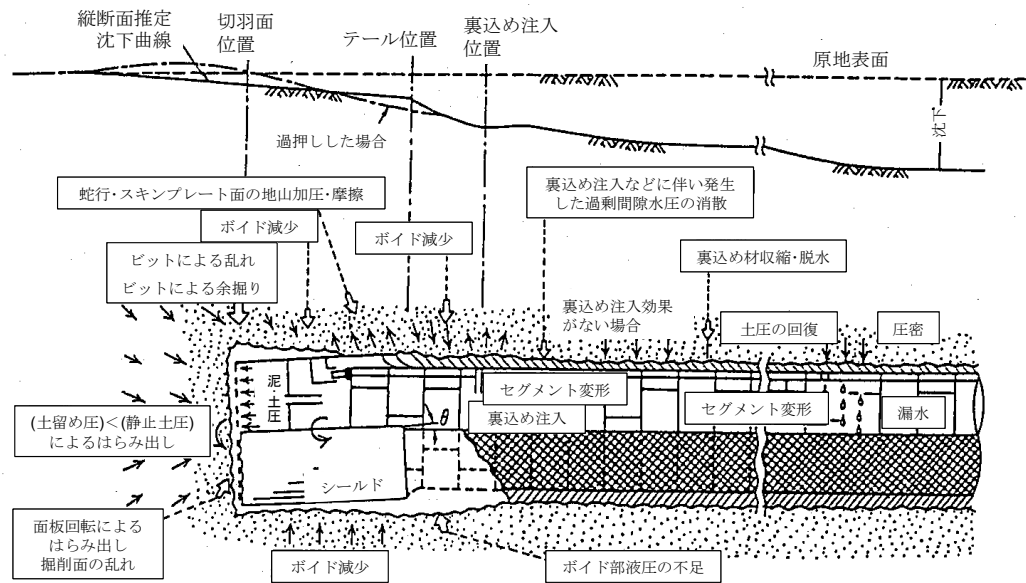
先行沈下は、切羽のかなり前方（数10m程度）から発生する現象である。この現象のメカニズムとしては、地下水位低下によって地山内の有効応力が増加し、地山が圧縮・圧密することによるものである。しかし、この現象は地下水位低下が発生する開放型シールドの場合であり、密閉型シールドの場合では、ほとんど発生せず無視できるものとされている。

(b) 第二段階 切羽前隆起沈下

1) 切羽前隆起沈下のメカニズム

密閉型シールドでは、切羽面での水平方向の地山応力（静止土圧）及び水压に対して、シールド機チャンバー内から適切な流体圧（切羽圧：泥水压あるいは泥土圧）を作用させることにより、切羽面に対して接線方向の応力は解放されるものの、切羽面に垂直な応力のバランスを図り、切羽の安定を保持する。

切羽圧が地山の初期状態（静止土圧＋水压）よりも低い場合、切羽面の地山応力は解放され、主働状態となり、地山の緩みやシールド機側への土砂の呼び込みが発生する。逆に、地山の初期状態よりも切羽圧が高い場合、切羽面の地山は、シールド機からの押し付け力を受け（受働状態）、切羽面付近の地盤が地山側へ移動する現象が発生する。また、泥水式

図 2-2 地山変位の原因・傾向概念図⁶⁾

シールドでは、泥水圧が地山強度よりもある程度以上高くなると、泥水圧による地山の割裂が生じ、地山の隆起、場合によっては地表面への泥水のブロー（噴発）現象が生じる。森ら⁷⁾は、このブロー現象を泥水圧による地山の割裂によるものであることを示し、割裂が生じる圧を割裂圧(P_f)として以下の式で定義している。

$$\text{砂質土の割裂発生圧 } P_f' = m \cdot \sigma_3' + R$$

m : 定数 (1~2 の範囲) σ_3' : 有効拘束圧 R : 亀裂推進抵抗

$$\text{粘性土の割裂発生圧 } P_f = \sigma_{\min} + q_u$$

σ_{\min} : 最小主応力 q_u : 一軸圧縮強度

2) 切羽前隆起沈下のシールド施工因子

①切羽圧

密閉型シールドでは、切羽面や掘削の状態を直接目視できないため、チャンバーや排泥設備等に設置した土圧計等の各種計測器の圧力を確認しながら掘進管理を行っている。切羽圧の掘進管理は、地山応力とシールド機前面からの泥土圧あるいは泥水圧等がバランスしているか否かを確認するものである。

切羽圧の設定は、地山での土圧+水圧を基本とする考え方が一般的で、このうち土圧については、主動土圧、静止土圧、緩み土圧を考えることが多い。理論的には、図 2-3 の土圧と変位の関係の概念図で示すように、できる限り静止土圧+水圧に近い状態でシールド掘進を行うことで地山の変位が最も抑制できると考えられる。

しかし、地山の初期状態（静止土圧＋水圧）を正確に把握することは困難であることから、通常は現場状況や施工者の経験あるいはトライアル施工により、地山が弾性的領域内（弾性領域内：およそ0.1%ひずみ未満⁸⁾）の小さな変形に収まることを目標に設定されている⁹⁾。

切羽前面に作用する水平土圧の算定は、対象地山の性状によって各種土圧算定法に基づいて使い分けられており、その代表的な算定方法を表2-3に示す。

なお、土被りがトンネル外径に比べて大きい場合、地山のアーチ効果が期待できるようになる。また、覆工の設計では、砂質土で土被りが $1 \sim 2D_o$ (D_o : セグメント外径) 以上、粘性土でN値8以上の硬い粘土で土被りが $1 \sim 2D_o$ の良質な地山条件において、緩み土圧が採用されることが多いとされている⁴⁾。この場合、切羽圧の設定にもその考え方を適用している場合がある。しかしながら、これは比較的大深度で硬い良質な地山条件下のものであり、この算定法の適用については確立されたものではなく、今後さらに研究が進められるべきものであると考えられる。

②切羽圧の変動

近年のシールド機の切羽圧は、シールド機の性能向上によって安定した制御が可能になりつつあるが、掘進中及び停止中の切羽圧を常時一定に制御することが難しいのが現状であり、掘進中の一般的な切羽圧の変動は、設定切羽圧の $\pm 2\text{N/cm}^2$ 程度とされている¹⁰⁾。しかし、切羽圧が大き

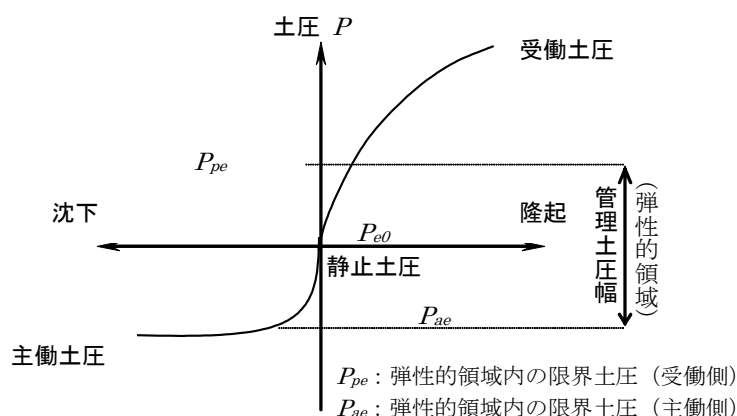


図2-3 土圧と変位の関係の概念図¹⁰⁾

表2-3 切羽前面に作用する水平土圧の代表的な算定法

土圧設定方法	基準となる荷重	適用理論・提案法	対象土
切羽前面に作用する水平土圧	土被り荷重 (全土被り鉛直荷重)	Rankine 主動土圧係数	粘性土 砂質土
		Brooker 静止土圧係数 Jáky 静止土圧係数	粘性土 砂質土
		B. B. Broms 理論	粘性土
	緩み土圧	Terzaghi 緩み土圧 Rankine 主動土圧係数	砂質土
切羽前面に生じる滑り面に関するモーメント	緩み土圧 滑り土塊荷重	対数ら旋滑り・試行錯誤法 (村山理論)	砂質土

く低下し（瞬間的な変動も含め）、静水圧や主働土圧よりも下回った場合に沈下が発生する¹¹⁾。また図2-4で示すように、トンネル直上1m位置の地山は、泥水圧の変動に応答した沈下挙動を示し、切羽圧の変動毎に累積（変動回数）し、沈下量が増加することが示されている。切羽通過前後のシールド機外周の地山は切羽掘削によって乱され、余掘り量（オーバーカット量）の分だけ沈下が発生する可能性があると考えられる。シールド機外周には、泥水式では泥水が、土圧式（泥土圧）では添加材や泥水が余掘り部にある程度回り込み、地山応力の解放を軽減すると考えられるが、その効果については明らかになっていない。

切羽圧の変動原因は次の項目が挙げられる⁹⁾。

- ・シールド掘削開始・終了
- ・シールド機の脈動（摩擦抵抗によるもの）
- ・ジャッキ操作によるもの（特にセグメント組立時）
- ・チャンバーを含む排土設備での土砂の固結及び閉塞
- ・泥水のバイパス回路への切替（泥水式）
- ・掘削土量と排土量のアンバランス（土圧式）
- ・裏込め注入圧の切羽への伝達
- ・泥水性状及び泥土性状の不良、チャンバー内土砂の攪拌不足
- ・チャンバー内土砂の充填不足（土圧式）
- ・泥水及び添加材の逸泥
- ・切羽前面の障害物及び空洞の出現

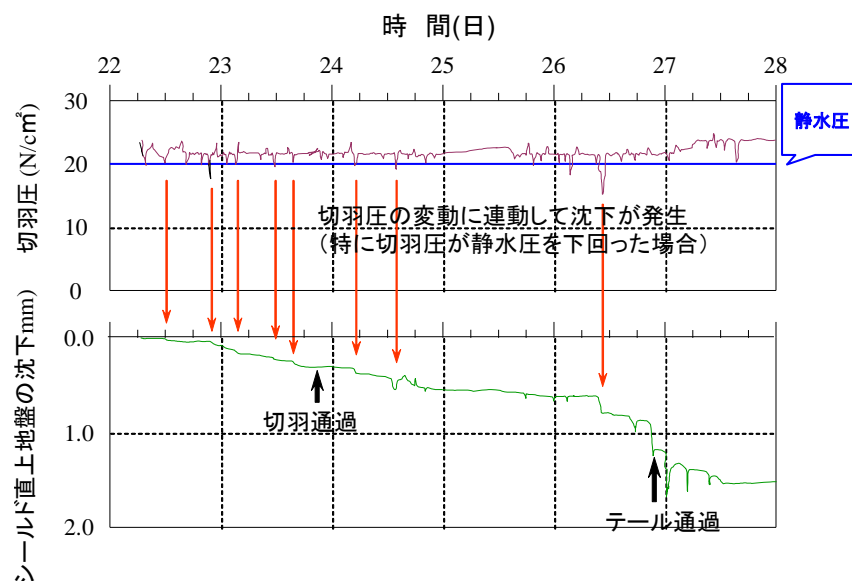


図2-4 切羽圧の変動と沈下挙動¹¹⁾

③掘削土砂の取り込みと排泥及び排土

密閉型シールドでは、掘削土砂のスムーズな取込み及び排泥・排土によって地山と切羽の圧力バランスが保たれ、地山の変位を抑制できると考えられる。

土圧式の場合は、一般に添加材を注入したチャンバー内の掘削土を攪拌することにより塑性流動化を図る。そして、掘進速度及びスクリーコンベヤー内のスクリーの回転数によって掘削土量と排土量のバランスを図ることにより、切羽圧を制御している。

泥水式の場合は、泥水を送泥管からチャンバー内に送り、チャンバー内で掘削土と泥水を攪拌し、排泥管を通して土砂を排出する。そして、送泥ポンプの回転数制御によって泥水圧の制御と排泥の流量及び密度による掘削土量の管理を行っている。

このように、密閉型シールドにおける掘削土砂の取込みと排泥・排土は、地山と切羽の圧力バランスを保つ上で重要であり、切羽圧と密接な関係がある。掘進速度やカッター回転数が同じでも、排泥・排土量が掘削土砂に対して少なくなると、切羽圧は上昇する。また、排泥・排土量が多くなると切羽圧が低下するとともに掘削土砂の取り込み量が増加する。その結果、地山の隆起や沈下が生じることになると考えられる。極端に掘削土砂の取込み量が多くなった場合は、切羽周辺地山に大きな緩みや空洞を生じさせることになり、地山の大変形や崩壊に至ることがある。

ただし、切羽圧の変化と取り込み量や排泥・排土量は、必ずしも1：1の関係ではない。地山の変化やチャンバー内の泥水・土砂の性状、掘進速度等にも依存するものと考えられる。

3) 切羽前隆起沈下における課題

切羽での地山の変位を抑制するためには、地山応力と切羽圧のバランス及び掘削土砂と排土量のバランスをコントロールすることが重要である。そして、切羽での圧力バランスを適切に行うためには、切羽圧制御のみならず、掘削土量と排土量の土量バランスを制御した総合的な管理によって切羽の安定を図る必要がある。

最近の施工事例では、慎重な施工管理を行うことで、切羽通過時の地山の変位を小さく抑えた施工が可能になっていると言われている。しかし、これらは、技術者の多くの経験に基づく慎重な施工管理と良好な地山によってもたらされた結果と言える。

したがって、現状では、まだまだ未解明な部分が多い切羽の管理手法を確立することが、切羽前隆起沈下を抑制するための最大課題であると考えられる。なお、泥水式と土圧式では、切羽安定機構が異なる特徴があるが、この特徴による地山挙動の相違やその発生メカニズムに関する研究は今後の課題と言える。

(c) 第三段階 通過時隆起沈下

1) 通過時隆起沈下のメカニズム

シールド機が地山を通過する段階においては、基本的にシールド機の掘削外周を流体圧

あるいはシールド機鋼殻により地山を支保する。しかし、実際には、掘削外周に作用する土圧・水圧に対して、シールド機から適切な圧力コントロールを行い、地山を完全に支保することは困難である。そのため、シールド機通過中の直上地山で沈下が増加する現象が多く見られる。この地山の変位は、切羽が遠ざかることによる三次元的な支保効果の低下、切羽圧のシールド後方への伝達効率の低下、掘進停止中の切羽圧の低下、掘進時の切羽圧の急激な上下変動、シールド機の姿勢変化（ピッチング、ヨーイング）、裏込め注入圧等の変動に応答して生じると考えられる。

2) 通過時隆起沈下のシールド施工因子

①シールド機外周の圧力バランス

シールド機通過中の切羽圧の低下や変動、裏込め注入圧に応答して生じる地山の変位は、掘削外周面を支保する圧力が変化することによって、地山の緩みや掘削外周の余掘り部が変形するためと考えられる。これは、切羽掘削時に余掘りを1～2cm程度（シールド外径によって異なる）を行うこと、この余掘り部に水圧＋ α （切羽圧の伝達効果、裏込め注入圧の伝達効果）が流体圧として作用するが、掘削外周面の土圧・水圧とのアンバランスが生じることが原因と考えられる。

②掘進の長期停止

シールド掘進が長期停止することにより、地盤沈下が増加する現象が多く見られる。図2-5は沖積の粘性土地盤中を泥土圧シールドで施工した3現場で、計測断面直下をシールド機が通過（切羽～テール）するまでの累積停止時間（掘進停止：セグメント組立、作業交代、休日、その他）とその間に生じた沈下の関係を示したものである。図では明らかに掘進停止時間の対数に比例して沈下量が大きくなっていることがわかる。即ち掘進停止時

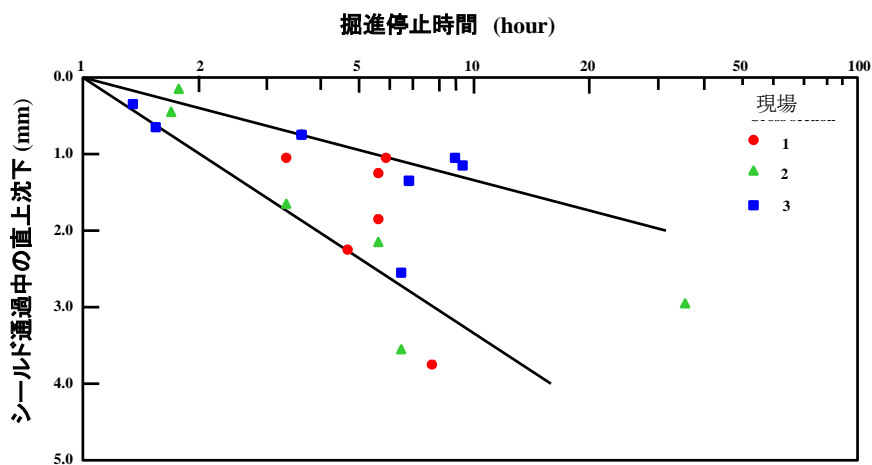


図 2-5 シールド掘進停止時間と地盤沈下¹²⁾

間が長くなる程，沈下量が大きくなると言える。

停止中の地盤沈下の増加原因は，次の事項が挙げられる¹³⁾。

- ・泥水及び添加材の浸透，漏水による切羽圧の低下
- ・チャンバー内の土粒子の沈降分離に伴う切羽内圧力分布の変化
- ・地山のクリープ変形

上記事項は，何れも地山応力と切羽圧のバランスに変化が生じることに起因した地盤沈下の発生であり，シールド掘進が長期停止することにより，掘削外周面の土圧・水圧とのアンバランスな時間がより長くなり，地盤沈下が時間経過に伴って増加すると考えられる。

③シールド機姿勢の変化¹⁴⁾

シールド機が水平に対して上向きか下向きかを表わしたものがピッチングである。地山の変位は，設計勾配を基準としたシールド機中心軸の傾きに密接な関係があり，設計勾配に対して掘進勾配が大きくずれることによって発生する余掘りが地山の変位の発生要因とされている。しかし，ピッチングの制御は機械固有の癖による止むを得ない限度がある。問題となるのは，設計勾配から大きくずれた場合などで，急激な軌道修正を行った場合と考えられる。

図2-6の概念図及び図2-7の計測事例で示すように，通過中のシールド機の姿勢がシールド基線に対して上向きの勾配で掘進した場合には，シールド機直上部が余掘りされることになり，新たな応力解放が発生し，これに伴う沈下が生じる。逆に，シールド機の勾配がトンネル中心線に対して下向きの場合には，シールド機テール付近の鋼殻が直上の地山を押し上げながら掘進することになり，シールド機鋼殻と地山との間の摩擦力が増加し，地山に対してせん断変形や乱れを生じさせ，地山の変位が発生する。したがって，軌道修正を行う場合においては，ある程度の長い区間を想定し，ピッチングを急激に変化させないような掘進管理を行う必要があると言える。

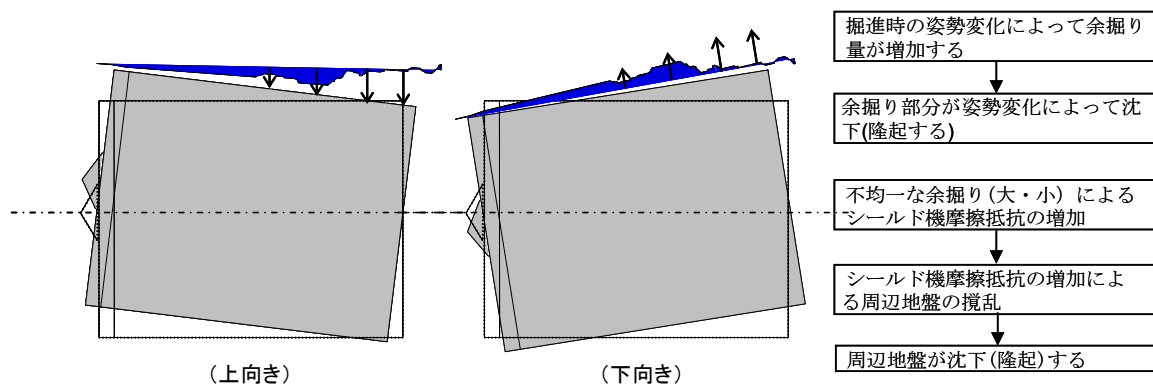
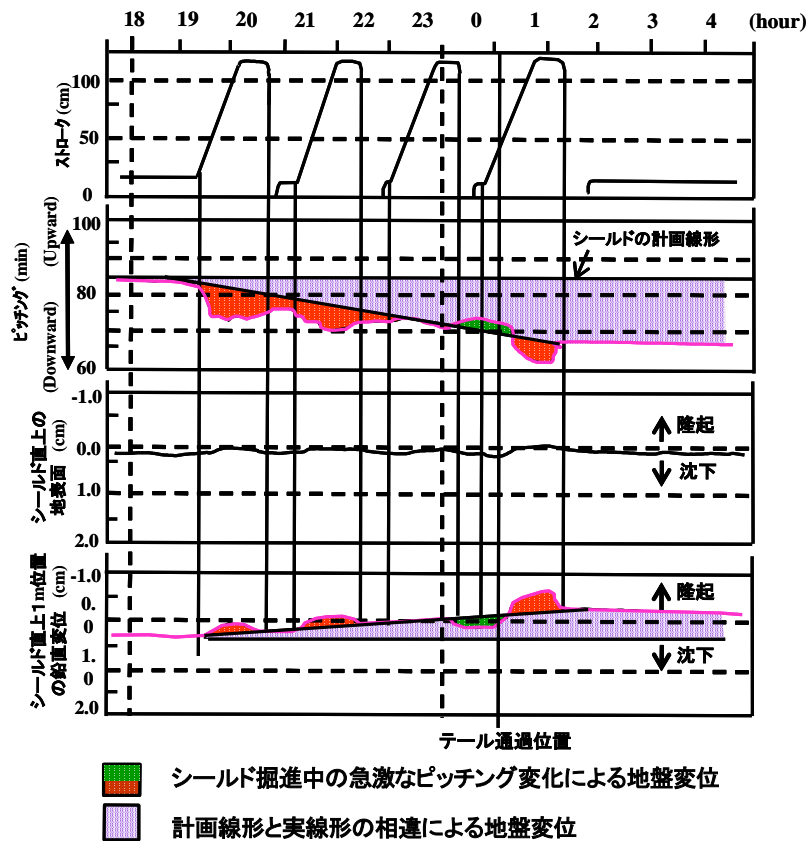


図2-6 シールド機のピッチングと変形の概念図

図 2-7 実測データによるシールド機のピッチングと変形¹¹⁾

ヨーイングは、シールド機を平面的に見て、シールド機が左右に変位する現象である。ヨーイングが発生した場合、シールド機左右側部の余掘り量が増加し、ピッチングと同様なメカニズムでトンネル側方の地山で変位が発生する。また、シールド掘進開始・終了時やセグメント組み立て時のジャッキ操作によってもシールド機の姿勢は変化し易い。シールド掘進開始・終了時に地盤沈下が増加するケースが多く見られるのは、こうしたシールド機の姿勢変化が一因であると考えられる。

3) 通過時隆起沈下の課題

シールド機通過時の地山の変位に対しては、シールド機の姿勢変化を極力抑え、できるだけ短期間にシールド機を通過させることが重要と言える。

しかし、曲線区間の施工では、必然的に中折れ装置を用いることや、コピーカッターによる余掘りを行うことによって、シールド機の姿勢を変化させる必要がある場合がある。その場合にも周辺地山を乱し、地山の変位を発生させることが考えられる。また、自立性の低い地山では、通常のシールド掘削においても余掘り部への土砂の落ち込みが生じ、地盤沈下が発生することが考えられる。

シールド機通過時の地山の変位を抑制するためには、シールド機掘削外周面の土圧・水圧にバランスする流体圧をシールド機から作用させることが有効と考えられる。しかし、

シールド機掘削外周面に作用する土圧・水圧に対抗するシールド機外周面への適切な圧力コントロールを行う確立した方法や技術がないのが現状である。これらは、今後の研究や開発の課題と言える。

(d) 第四段階 テールボイド隆起沈下

1) テールボイド隆起沈下のメカニズム

この段階は、セグメント覆工がシールド掘進に伴ってシールド機テール部が地山に脱出し、同時に地山とセグメント覆工間に生じるテールボイドに圧力を持った裏込め注入材が充填され、この注入材が固化し、ある程度の強度を発現するまでの段階である。

同時裏込め注入の場合、テールボイドが発生すると同時に裏込め注入材を加圧・充填するものとしているが、実際の施工では、掘進開始直後から注入開始までに若干のタイムロスが生じる。また、注入材が充填された状態であっても、ある程度の強度を発現するのに時間を要するとともに、裏込め注入材の固化収縮に伴う応力解放が生じるものと考えられる。

テール部脱出直後の周辺地山は、まず裏込め注入開始までに応力解放が生じる。さらに裏込め注入開始後、地山は裏込め注入圧を受けることになるが、地山応力とのアンバランスによって地山に変位が生じる。裏込め注入圧が、地山応力よりも大きい場合は、裏込め注入材を介してトンネル法線方向に押し広げる圧力が作用することになり、それに伴う地山の変位が発生する。逆に、裏込め注入圧が地山応力よりも低い場合は、応力解放が生じ、地山の緩みやトンネル法線方向への地山の呼び込み現象が発生する。テールボイド部の応力解放による地山の沈下は、テールボイド発生から裏込め注入材が固化し、地山と一体化するまでの間で生じると考えられる。

2) テールボイド隆起沈下のシールド施工因子

①裏込め注入

比較的硬質な地山では、裏込め注入により地山を押し広げることが少なく、過大な注入圧で裏込め注入を実施した場合のみで見られる挙動であり、殆どの場合、テールボイド発生と同時に応力解放が生じ、沈下が発生すると考えられる。しかし、土被りが浅く比較的軟弱な地山では、裏込めの注入圧や注入量の程度、注入圧の急激な変化等、施工状況によって地山の挙動が大きく異なる。また、裏込め注入が遅れて実施された場合や注入量が充分でない場合、裏込め注入管の閉塞が生じた場合などでは地山応力が解放され沈下が発生する。一方、過剰な裏込め注入圧や注入量の施工を行った場合には隆起や地山の割裂が生じる。

裏込め注入による地山の変位の抑制を考えるならば、クラウン部の初期応力（鉛直土圧＋水圧）に等しい注入圧をトンネル全周に作用させること、発生したテールボイドが注入材で完全に充填される注入量であること、その裏込め材が収縮せずに硬化することが望ま

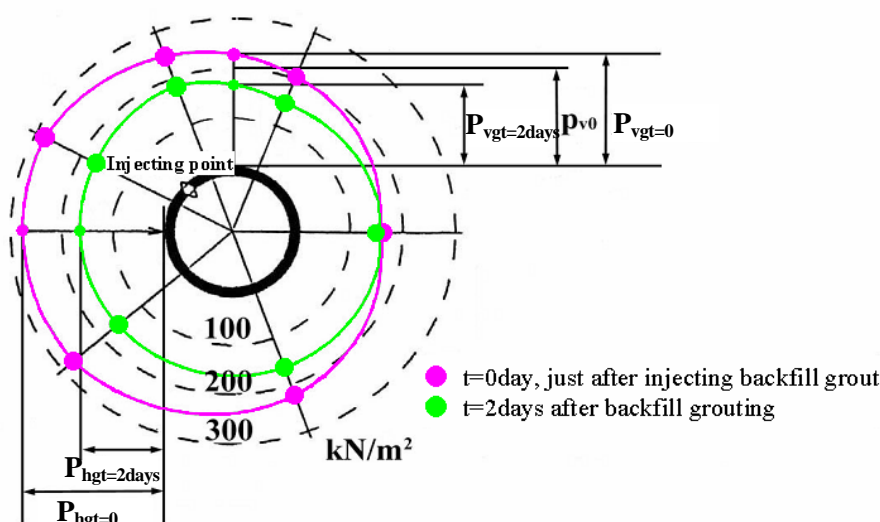


図 2-8 テールボイド部に作用する裏込め注入圧¹⁵⁾

しい。しかし、トンネルに作用する土圧＋水圧は、クラウン部、インバート部、スプリングライン部等で異なる。また、注入口数にも制限があるため、注入圧を全周にわたり初期地山応力と等しくすることは難しい。そのため図 2-8 に示すように、注入口付近では比較的大きな注入圧が作用し、注入口から離れた位置では注入圧が小さく、地山に偏った圧力が作用する場合がある。この場合、局所的な地山の変位が生じることが考えられる。

注入量は、ボイド量、地山の変形、注入材の圧縮、トンネル内空の収縮、または注入材の漏洩にも依存するため、適正な量を正確に把握することは容易でない。そのため、実際の注入量は、シールド機外径とセグメント外径の差から算出される理論テールボイド量に幾らかの割り増し分を加えた量（理論テールボイド+ α ）を適正注入量として管理している場合が多い。この割り増し分を加えた適正注入量は、従来の実績やトライアル施工結果に基づいて120%～140%としている場合が多いが、地山の変位を抑制するためには、地山の変化やコピーカッターによる余掘り量の変化に適時対応した適切な注入量管理を行う必要があると考えられる。特に曲線施工区間でのコピーカッターによる余掘り部への注入量が不足した場合、大変形や地山の崩壊につながる可能性がある。

②裏込め注入時間

通常の自動注入制御では、掘進開始と同時に注入が開始され、掘進終了と同時に注入が終了となる。しかし、掘進終了と同時に注入を終了した場合、完全に裏込め注入材がターボイド内に充填されているかどうか疑問である。注入量が充分でない場合は、地山と裏込め注入材との間で空隙が生じ、この空隙分の地山応力が解放されることで、地山の変位が発生することが考えられる。

したがって、注入量の不足を補うためにも、掘進終了後も数分間の継続した注入を行い、所定圧力（設定限界圧相当）及び注入量に達することを確認する施工管理手法が有効と考

えられる。

3) テールボイド隆起沈下の課題

テールボイドの裏込め注入は、同時裏込め注入工法の開発や注入材の改良・開発が進み、比較的良好な施工ができるようになってきたと言える。また、経験的なものが中心ではあるが、裏込め注入の圧力管理と量管理を併用した定量的な管理が一般に行われるようになり、テールボイドでの地山の変位量は、飛躍的に小さくなっている。更に、昨今におけるトンネルの切広げ工事や連結工事では、概ね 8~10cm 程度の厚さで比較的均一に固化した注入材の充填状況を実際に見ることができ、裏込め注入施工としては現時点で確立された工法になっていると考えられる。

しかし、現状の裏込め注入施工にも問題点はある。同時注入の場合、注入管の閉塞や機械トラブルによって掘進や注入の遅れが生じることがある。これらが地山の変位を増加させる要因と考えられる。また、切羽同様、施工中のテールボイド部を直接目視することができないため、裏込め注入圧や注入量が一定以上になっていることを施工データから事後確認するに留まり、トンネル全区間において、ボイド量に対して十分な注入材の充填ができていないか確認できていない。

最近では、触針（触圧）式や反射波（超音波、電磁波、弾性波など）の方式を用いた地山崩壊探査装置の開発により、地山の緩み状況、地山とシールドとの空隙、テールボイド量を計測し、この計測結果に連動した注入管理方法が考えられているが、一般的な実用には至っていない。地山の変化や余掘り量の変化等、切羽掘削時のデータをリアルタイムにフィードバックできるシステムの構築が必要と考えられる。

(e) 第五段階 後続沈下

1) 後続沈下のメカニズム

この段階は、セグメント覆工周辺に充填された裏込め注入材が周辺地山と密着して固化し、トンネルに作用する土圧や水圧がセグメント覆工によって保持され、掘削空間が安定した段階である。

比較的硬質な地山では、この段階での地山の変位は少ないと考えられる。

比較的軟弱な地山では、この段階でも長期にわたって沈下（後続沈下）が発生する場合が多い。この沈下の主な要因は、シールド掘進に伴う周辺地山の乱れと間隙水圧の変化である。周辺地山の乱れは、切羽通過時、シールド機通過時、テール通過時の全般にわたって、地山が過大な切羽圧の作用やシールド機との摩擦により、せん断変形を受けることによって生じると考えられる。これらの地山の乱れにより、特に軟弱粘土地盤では、間隙水圧の上昇に伴う有効応力の減少、また、乱れに伴う体積変化や強度低下などが引き起こされ、通過後長期にわたって圧縮・圧密及びクリープ的な残留沈下が発生すると考えられる。裏込め注入によって地山に過剰な圧力が作用した場合は、地山内に過剰間隙水圧が発生し、

その消散とともに沈下が発生する。その他、裏込め不足やセグメントシール材の不適切、セグメント組立誤差、セグメントからの漏水も圧密、後続沈下の要因と考えられる。

なお、セグメントには、地山の土圧や水圧が作用することで、セグメントが変形し、更にその変形に起因した地山の変位が生じることが考えられるが、一般にその量は極めて微小であり、問題となることは少ない。

2) 後続沈下の課題

後続沈下の要因は、シールド掘進に伴う周辺地山の乱れである。これは、シールド機切羽通過時からテール通過時まで、どのような施工を行ったかということと地山条件とに密接な関係がある。

図2-9は、粘性土地盤中をシールド掘進した時の切羽通過前からテール通過時（第二段階から第四段階）までに生じた地表面及びクラウン部直上1m位置の地山変位量と後続沈下量（テール通過1D後以降に生じた沈下量）の関係を示したものである。切羽通過前からテール通過時まで生じた地山変位量がシールド掘進に伴う周辺地山の乱れの指標と考えれば、図2-9で明らかなように、周辺地山の乱れが大きいほど、後続沈下量が大きくなることがわかる。

したがって、後続沈下を抑制するには、先に示した施工の第二段階から第四段階までに、如何に地山を緩めず、乱さず施工を行うことが重要と考えられる。

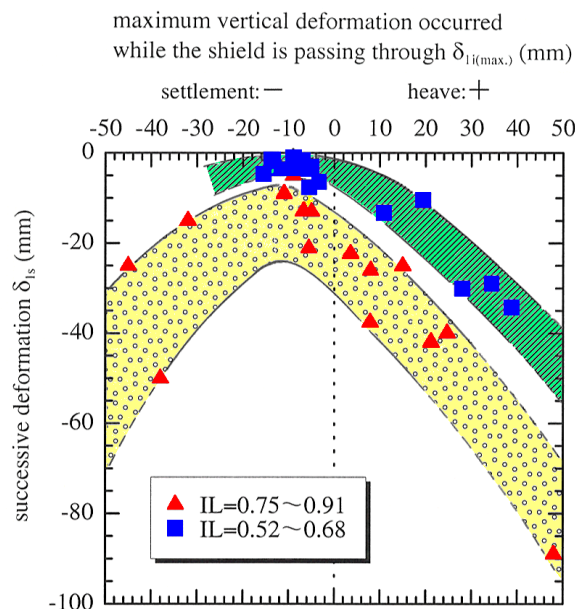


図2-9 粘性土地盤における周辺地山の乱れと後続沈下量¹⁶⁾

2.2.2 泥水式シールドと泥土圧シールドにおける地山挙動の相違

図 2-10 に示すように、泥水式と土圧式シールドの相違は、チャンバー内の圧力を保持させる媒体の違いであり、一般的な切羽安定に関する基本的な考え方は同じと考えられている。また、泥水式及び土圧式の切羽安定は、表 2-4 に示す働きにより成立するとされている。泥水式と土圧式の最も大きな相違は、泥水式が切羽面に泥膜（マッドケーキ）を形成し、チャンバー内に満たされた泥水を加圧して、切羽の安定を図るのに対し、土圧式は、常に掘削土量と排土量がバランスさせて、切羽の安定が図られる。

泥水式では、主に良好な泥膜を形成するための泥水性状と泥水圧を管理することで、切羽の安定を図る。一方、土圧式は、チャンバー内と掘削土砂で地山応力に対抗しながら、掘削土量と排土量とをバランスさせなければ、切羽の安定を保つことが難しい。そのため、圧力バランスを適切に行うために、切羽圧、掘削土量、排土量、チャンバー内の土砂性状を総合的に管理しなければならず、泥水式と比べ切羽を安定させるための施工管理が難し

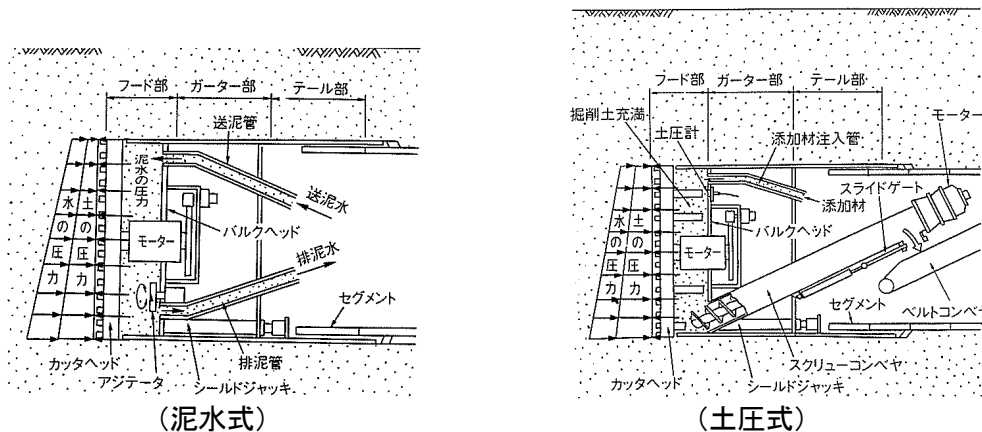


図 2-10 泥水式・土圧式の切羽機構

表 2-4 泥水式・土圧式の切羽安定

形式	泥水式シールド	土圧式シールド
切羽の安定	①泥水圧により土圧及び水圧に対抗 ②切羽面に不透水性の泥膜を形成 ③泥水の浸透により切羽付近の自立性を高める	①泥土圧により土圧及び水圧に対抗 ②排土機構により、排土量を調整 ③泥土の塑性流動性や不透水性を確保
泥水・泥土の機能	①切羽の崩壊を防止 ②泥水中に浮遊する土砂を保持する ③土砂の運搬を助ける	①切羽の崩壊を防止 ②適当な塑性流動性を有し、切羽圧の管理を可能にする ③不透水層構成、地下水の坑内への噴出防止

いとされている。

2.3 地山の変位を抑制するための課題

これまでに述べた地山の変位に及ぼすシールド施工因子の総括を表 2-5 に示す。また、施工因子は、以下のように大きく次の 2 つに分類できる。

- ① 圧力のアンバランス
- ② 量のアンバランス

上記及び表 2-5 に示すように、シールド掘進に伴う地山の変位は、各施工段階での圧力や量を如何に初期地山応力とバランスさせた掘進管理ができるかどうかにか集約できる。しかし、シールド施工では、各種技術開発や機械性能が向上した現状においても、裏込め注入と比べ、切羽での圧力や量を定量的に評価し、管理する手法が確立されておらず、技術者の経験に頼っている部分が多い。そのため、施工管理にあたる技術者によって認識内容が異なるケースが見受けられる。

現在のシールド施工技術から、更に地山の変位を抑制するためには、次に示す課題を解決する必要があると考えられる。これらは、各施工段階での違いはあるが、どれも圧力と量のバランスに係わるものである。

- ① 切羽管理手法の確立
- ② シールド通過中の掘削外周部の圧力制御方法
- ③ 曲線施工区間の余掘り管理
- ④ テールボイド量の定量的な把握と裏込め注入材の充填確認方法

工法的には裏込め注入工法のようにほぼ確立されたものがある。図 2-11 は最近のシールド施工における地山挙動を示したものであり、特に裏込め注入工法の向上により、テール

表 2-5 地山の変位の施工因子と管理項目

地盤変位の種類	施工因子	現場での主な施工管理項目
①先行沈下	・地下水の汲み上げ	・地下水位
②切羽前隆起沈下	【圧力のバランス】 ・地山応力と切羽圧のアンバランス ・切羽圧の変動 ・シールド掘進の長期間停止 【量のバランス】 ・掘削土量と排土量のアンバランス	・切羽圧 ・掘削土量 ・排泥・排土量 ・掘進速度 ・ジャッキ推力 ・泥水、泥土の性状 ・余掘り量 ・シールド機の姿勢
③通過時隆起沈下	【圧力のバランス】 ・シールド機外周圧と地山応力のアンバランス ・シールド掘進の長期間停止 ・シールド機の姿勢変化	・シールド機の姿勢
④テールボイド隆起沈下	【圧力のバランス】 ・地山応力と裏込め注入圧のアンバランス 【量のバランス】 ・ボイド量と裏込め注入量のアンバランス ・裏込め注入の施工時期、時間	・裏込め注入圧 ・裏込め注入量 ・裏込め材の性状
⑤後続沈下	・上記全因子	——

ルボイド部での沈下量¹⁷⁾が小さくなっていることがわかる。また、上記のうち、②、③、④はシールド機の性能や調査計測技術が向上することで、対応可能なものと考えられるものや、現在、研究が進められているものと考えられる。

①の切羽管理手法は、これまでに述べたように、従来の技術者の経験による定性的な管理から、理論に基づいた定量的な管理手法の確立が必要と考えられる。特に、土圧式シールドでは、切羽の管理手法が確立されていないことが、トラブルの発生原因になっていると考えられる。

第3章で後述するように、昨今における大きなトラブルは、切羽での地山崩壊・陥没事故である。これらの事故は切羽での圧力と量のアンバランスによって発生したものであることから、切羽周辺で生じているシールドと地山との相互作用のメカニズムを明らかにすることが課題になると考えられる。

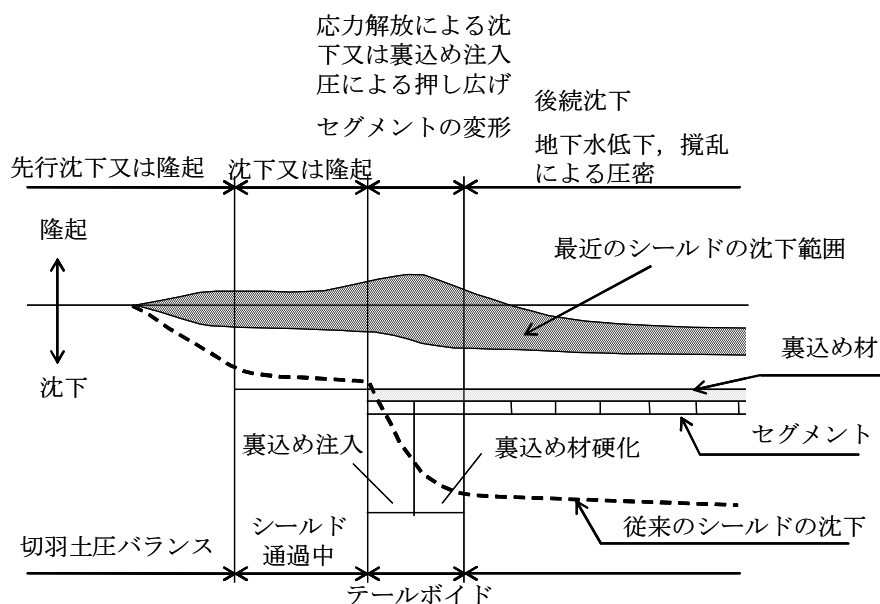


図 2-11 最近のシールド施工における地山挙動¹⁷⁾

参考文献

- 1) 吉田 保：シールド掘進に伴う地盤及び構造物挙動と近接施工に関する研究，学位論文，1994
- 2) 高田正治，木村 宏，神田 大，小山幸則，水原勝由：帯水地盤における土圧式シールド施工に伴う有効応力変化と地盤変位に関する研究，第15回トンネル工学 報告集，pp. 339-346，2005. 12.
- 3) 田中 弘，高橋良文：シールド掘進に伴う地盤変状入門(2)シールド掘進に伴う地盤変状概論，トンネルと地下，Vol. 33,No. 12，pp. 63-73，2002. 12.
- 4) 平成8年度版：トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説，土木学会
- 5) 栗原和夫，野本 寿，大塚正博，橋本 正：掘削と周辺地盤の変状 6. シールドの掘進と周辺地盤の変状，土と基礎，Vol. 43,No. 7，pp. 57-62，1995. 7.
- 6) 山本 稔ほか：トンネル技術者のための土質工学(6)，トンネルと地下，Vol. 18,No. 9，pp. 66-69，1987. 9.
- 7) 森 麟，田村昌仁，千柄 植：砂質地盤における割裂発生機構，土木学会論文集，Vol. 388 III-8，pp. 61-70，1987. 12.
- 8) 平山英喜，福田悦治：土のひずみレベルを考慮したN値からの割線弾性係数の推定，第23回土質工学研究発表会，pp. 1247-1250，1988. 6.
- 9) 橋本 正，水原勝由：シールドトンネル工事に伴う現場計測と施工管理，現場計測と施工管理，地盤工学会中国支部，pp. 1-24，1997. 3.
- 10) 佐野 寛，太田 擴，橋本 正，高見邦幸：軟弱粘土地盤中の密閉型シールドにおける切羽圧土管理について，第25回土質工学研究発表会講演集，pp. 1763-1764，1990.
- 11) 松下征雄，山崎福市，岡本嘉彦，橋本 正，今西 肇：大断面泥水シールド工におけるマサ土地盤の変状と施工要因，山留めとシールド工における土圧，水圧と地盤挙動に関するシンポジウム，pp. 261-266，1992. 5
- 12) 岸尾俊茂，太田 擴，仲井信夫：土圧式シールドトンネルにおける地盤挙動と沈下抑制工法，山留めとシールド工における土圧，水圧と地盤挙動に関するシンポジウム，pp. 245-252，1992. 5.
- 13) 橋本 正，早川 清，大塚正博，野本 寿：掘削と周辺地盤の変状 6. シールドの掘進と周辺地盤の変状，土と基礎，Vol. 43,No. 8，pp. 57-63，1995. 8.
- 14) 松下征雄，萩原兼秀，橋本 正，今西 肇：大断面シールド機の姿勢と地盤変状，第3回トンネル工学研究発表会，pp. 251-256，1993. 11.
- 15) T. Hashimoto：Experiences in monitoring in Japan for shield tunnels，Workshop Measuring and Predicting the Behavior Tunnels，2002. 10 Delft.
- 16) T. Hashimoto, K. Hayakawa, K. Mizuhara, T. Konda：Investigation on successive settlement due to shield tunneling, IS-Tokyo 99，pp. 233-238，1999. 7.
- 17) 橋本 正：シールド工における地盤変形とトンネル覆工土圧 ー裏込め注入の役割ー，可塑性グラウト協会 エアパック部会 特別講演資料，pp.1-10，1995.5

第3章 泥土圧シールド工法における掘進管理と課題

3.1 はじめに

近年の密閉型シールドによる施工においては、泥土圧シールド工法の適用が約7割以上を占めており、泥水式シールド工法を凌駕する状況となっている。掘削条件や地山種別に関わらず、その適用範囲は広がってきており、河川や海底下などの高被圧帯水層以外においては、ほとんどの地盤を対象として用いられている。

泥土圧シールド工法は、掘削した土砂に添加材を注入して、チャンバー内でジャッキ推進力により加圧しながら攪拌することにより泥土化するとともに、その泥土圧力により掘削切羽の安定を図りながら掘進する工法である。

その掘進の反応として現われる地山挙動による地表や地下構造物への影響を極力抑止することが求められる条件下において、泥土圧シールド工法により適切な掘進管理を行うためには、掘進情報と地山挙動について綿密な分析を行い、総合的な判断を得て掘進管理に反映する作業を間断無く繰り返すことが求められる。

泥土圧シールド工法は、掘進（マシン）⇔地山挙動（計測）⇔技術者（マシン操作・分析・判断）の一体的管理の達成により成り立つ工法であり、施工状況を総合的に判断して、マシンを制御して掘進を遂行する流れを確実に実行するために、管理者の技術判断に依存するところが大きい、いわゆる「掘進管理に職人技が必要」とされる工法である。

泥土圧シールドの掘進管理に際して、「切羽の安定方法が泥水か泥土かの違いであり、泥水の延長線上に泥土のシステムがある」との誤った認識を例として、この工法の切羽安定機構と掘進管理方法についての捉え方を簡明・的確に示したものがなく、また技術者によりその解釈が異なったり、曖昧な場合がある。この状況に鑑み、本工法の基本原理と掘進管理のあり方を明確に示すことが必要であると考えるところである。

本章では、まず、泥土圧シールド工法の開発に至る経緯を整理し、さらに実際の施工において発生した不具合な事象の原因のうち、特に掘進管理にかかわる要因について考察することにより、工法に内在する課題を明らかにする。

ここで得た成果は、後の章で論じる掘進作用力による地山挙動のメカニズムの分析と考察および掘進管理に関する掘進管理上の鍵を明らかにするための基礎となる。

3.2 土圧式シールド工法の開発経緯

3.2.1 シールド工法の歴史^{1), 2)}

1818年イギリス人 M. I. Brunel が初めて「シールド」を考案して特許をとった。彼の考案したシールドは、円形のトンネルの外郭には鋳鉄を利用し、切羽が露出する面積を

細分して崩壊の危険性を減少しようというものであり、いわゆる開放型手掘りシールドの原型と呼べるものであった^{文献}。

1823年、ロンドン、イーストエンド地区のテムズ河畔にあるロサーハイスから対岸のスワッピング間に道路トンネルを建設する計画を立て、1825年の暮に世界で初めて、延長約365mのシールドの掘削を開始したが、数度にわたる浸水事故や落盤事故のため中止の止むなきに至り、シールドに改良を加えて9年後の1834年に工事を再開した。その後も、何度かの浸水があり、またメタンガスに悩まされるなど工事は難渋をきわめたが1840年11月、ついにシールドは到達立坑に達した。

1869年になると、Brunelのトンネルに次いで第2のトンネルがテムズ河底に計画された。これを担当することになったBarlowとGreatの2人は、T. H. Greatheadが新たに開発した円形のシールドを採用し、鑄鉄製のセグメントを用いて無事にトンネルを掘り終えた。

その後、Greatheadは、1887年に南ロンドン鉄道のトンネル工事に、初めてシールドと圧気工法を組み合わせることにより粘土と砂利の地山を克服したのである。この圧気を使用したシールド工法が成功したことにより、その後ロンドンの地下鉄網の建設に広く採用されることとなり、現在のシールド工法の基礎を築いた。

3.2.2 わが国におけるシールド工法の開発³⁾

英国南ロンドン鉄道トンネル工事でシールド工法の基礎が築かれて約30年を経た1917年に、国鉄羽越線折渡トンネル(秋田県)の建設にシールド工法が初めて採用された。しかし、地質が悪く、湧水の噴出などがあり、軟弱地質の区間を突破してその使命を終えた。

その後、昭和の初頭、丹那トンネルの工事において、湧水処理の目的で直径3mのシールドで導水用トンネルを掘進したが、高水圧などの理由で、100m程度を掘進したにとどまった。

シールド工事が本格的な規模で採用されたのは、1936年に着手された鉄道省の関門海底トンネルの建設においてである。

この工事は、下り線3,614mのうち門司側の不良地山726mを直径7mの手掘りシールドで圧気工法を併用して掘進し、かつ途中の貝殻混じり砂層では噴発防止のために薬液注入を行い、約2年を要して工事を無事完了させた。この成功によって、わが国のシールド技術が初めて確立したといえる。

第2次大戦後再開された土木工事において、シールド工法が各所で採用され始めた。1953年の関門国道トンネルにやや遅れて1957年には営団地下鉄丸の内線の永田町付近においてルーフシールドが採用された。この工事は、都市トンネル工事で実施された最初のシールド工事であった。

シールド工法の急激な発達は、施工の機械化についても強い刺激を与え、手掘り方式の

シールドにおける切羽の掘削作業に機械を使用するといういわゆる半機械掘り方式以外に、掘削と推進を一体的に施工する機械掘りシールドも開発され次第に実用化されていった。

シールド工法初期に採用されたブラインドシールドは、切羽前面を小さな開口部を残した面版で塞ぎ、シールドを推進させると開口部からトコロテンのように出てくる土砂をスコップ等で排土する形式であった。

この工法においては、排出土砂は掘削相当量の半以下となり、地表面が大きく隆起したり、セグメントの組立作業ができるように掘進停止時に全部のジャッキを縮めたためシールドが一リング分戻り、路上が陥没するなど、技術者や熟練工の勘や経験が大きくものをいった工法であった。

その後、地山を切削するカッターを有した面板の後ろに隔壁を設けてチャンバーを形成して、チャンバー内の掘削土をスクリーコンベヤーにより排土する機械式シールドが開発されたが、流動性が悪い土砂の場合には切削土砂をチャンバー内に充満させることができないことから、チャンバー上部に空洞を生じることとなり、この空洞部に湧水とともに土砂が崩落して切羽の安定が保てなくなることから、切羽の安定をいかに保つかが大きな命題であった。

1964年には、泥水式シールド(セミシールド)が荒川左岸流域下水道で採用された。フランスにおいて1961年に考案された技術を実用化したものであった。わが国のシールド技術は、海外からの技術導入から独自技術の開発へと進んできたが、これを促したことから圧気シールド工法における酸欠事故と薬液注入による薬害事故があげられる。

切羽安定のために圧気で対抗させようとする圧気シールド工法においては、地質によっては酸欠空気が噴出する危険があることや、補助工法としての薬液注入による薬害が懸念されたことに加えて、作業の安全性と施工能率の向上を目的として、短期間に圧気に代るシールドの開発へと繋がり、1974年頃までは圧気併用の手掘り式が全体の3/4を占めていたが、その後の10年の間に圧気併用の手掘り式が減少し泥水式シールドが急速に広まった。

3.2.3 泥水式シールド工法の特徴と課題⁴⁾

トンネル掘削作業について地山の応力状態の変化から見ると、概ね地山自重と地下水による初期応力状態にある地山を切削することにより、掘削断面内の応力を発生させている等価な力を取除く行為に相当することである。したがってトンネル掘削に際して地山変位を抑止し切羽安定を確保するためには、切削される部分の土圧と水压に相当する圧力を補う必要がある。

泥水式シールドにおける切羽安定は次の働きにより成立している。

- ① 掘削部分に地山から作用する地山の土圧および水压に、泥水压により対抗する。
- ② 泥水压を有効に作用させるために、切羽面に不透水層の泥膜を形成させる。

③ 透水性のある地山では、泥水の浸透により切羽付近の自立性を高める。

すなわち泥水式シールドでは、一定の圧力を持った泥水をチャンバー内に送り込むことにより泥水圧と地山圧力をバランスさせて切羽の安定を図るために、「泥水の性状確保と圧力設定」が管理の原点となる。チャンバー内での泥水圧の鉛直方向の分布は台形となることや泥水は坑外で生成されパイプで切羽へ送られることから物性と圧力の制御は確実であり、工法原理の理解は比較的容易である。—1980年頃まではシールド工事での採用は70%程度にも達しており、河底下や海底下などの高水圧帯水地山の掘削において切羽安定の信頼性が高く大断面シールドに多用されてきた。

一方、掘削土砂は泥水として坑外へ排出されることから、①泥水から掘削土砂を分離するための大規模な処理設備 ②設備を設置するための広大な基地用地 ③土砂を分離させる際の振動・騒音対策が必要になり、さらに④分離した掘削土砂は泥濘化により産業廃棄物対象となり、これらの難点を解決することが可能なシールド工法の開発が囑望された。

3.2.4 土圧式シールド工法の開発と特徴⁵⁾

(1) 開発経緯

土圧式シールド工法は、1970年代に入って研究開発が進められた。開発当初は、工法の基本である掘削土を用いて切羽の安定を図るという考え方はまだ希薄であり、切羽の安定とチャンバー内に取込んだ土砂の排出は別個のものとして、切羽の安定は面板で行い、掘削土砂は機械的方法により排出口に誘導することを目指したものであった。

実機として採用されたのは1974年12月に着手された外径φ3,720mmの水道用シールドトンネル⁶⁾が最初である。

このシールドマシンは、面板形式の回転カッターとスクリーコンベヤーの組合せがポイントであり、面板とその後方に設けられたチャンバー内部から掘削したずりを連続的に排出することができる装備となっていた。

当時の土圧式シールド工法の基本的な特長として示されている事項について以下にその要点を示す。現在においてもなお、技術開発が進められている項目が含まれていることには注意が必要である。

- ① チャンバーとスクリーコンベヤーの内部に土砂が充填されているため、カッター切削による切羽土砂取込みが均一で、切羽頂部の流れ込みによる崩壊がない。
- ② スクリーコンベヤーの回転力によって内部の土砂を圧密して土砂による止水壁を作り出すことにより、地下水圧に対抗することができる。
- ③ スクリーコンベヤーの累積回転数を計測することにより、排土量を算定し管理することができる。
- ④ 切羽地山に生じている土圧に相当する土砂の圧力を保持しながら排土することができる。

- ⑤ シールド推進とカッタートルク間のインターロック, 切羽土砂の取込み量とスクリーコンベヤーによる排土量とのインターロックにより, 安全かつ適切に施工することができる。

この工法採用の初期においては, 掘進管理の方法については試行錯誤の段階であり, 施工時に生じた問題点の事例として次のような記録がある^{7),8)}。

- ①粘土がシールド機内に付着し, 閉塞気味となって掘削土砂がスムーズに流れなくなった。その結果, カッタートルクが上昇し掘進困難となり, 出てくる排土量は著しく少なく, 直径 5cm ほどのピンポン玉のような土砂で, しかも熱を持っている。
- ②土圧計などの計器から判断して, 切羽前面の土砂が圧密脱水され, 面版との摩擦熱により排土が熱くなったと判断された。付着粘土を除去し土砂をスムーズに流動させることを目的として, 水を高圧噴射で注入するとともに石けん水も入れてみたが, 進行も上らず難航した。
- ③スクリーゲート口から土砂と地下水が噴き出てくるいわゆる「噴發現象」が発生し, 土砂を所定の土圧計数値になるまで充満すると収まるが, カッタートルクが上昇して掘削不能となる。シールド機の操作上, そのバランスが非常に難しい。この現象は土質や地下水位に左右されるが, 一定の法則があり, チャンバー内の土圧計や水压計, トルクや土質状況を総合的に判断してシールド機の操作を行う必要がある。

これらの記録から, 施工現場においては様々な困難が生じており, 数値化されない経験則即ち職人技によるマシン操作が必要であり, チャンバー内掘削土の取り扱いが解決しなければならない課題であったことがわかる。

(2) 多様な泥土圧シールド工法

土圧式シールド機による施工が初めてなされた時期と同じくして, 1974 年 6 月に帯水砂質土地山にも適用できることを主目的として, 泥土圧シールドの具体的工法として「泥土加圧式シールド工法」の特許出願がなされた^{9),10)}。

この特許には, 工法の基本原理として下記のポイントが示されている^{文献}。

- ①カッターヘッドの後部に攪拌翼を設ける。
- ②カッターチャンバーに溜まる掘削土砂に作泥土材を注入してこれを攪拌翼により攪拌混合する。
- ③地山とほとんど同程度の単位体積重量をもつ不透水性の泥土に変換する。
- ④泥土をカッターチャンバーとスクリーコンベヤー内に充満する。
- ⑤泥土化された掘削土砂に, シールド機推進用ジャッキの推力により土圧を発生せしめる。
- ⑥泥土圧を常時一定に保持しながら, スクリーコンベヤーにより排土しつつ掘進する。

この特許申請には泥土圧シールド工法の基本原理が凝縮しており、1984年に特許が確定した。

特許申請から確定までの10年間に於いて、特許に抵触しない形で同類工法の開発が競われ、その結果、削土加圧式・土圧バランス型加水式・高濃度泥水加圧式・加泥式など表3-1に示されるように、切羽の安定を図る機構の相異をもとに、様々な形式・呼称の泥土圧シールド工法が生まれた^{11),12)}。

表 3-1 砂質土地盤におけるシールド分類名称と切羽の安定機構

切羽安定方式とシールド分類名称	切羽の安定機構
(1)方式 (削土加圧式)	①面板による山留め効果 ②添加材によるチャンバー内土砂の流動性の確保 ③ロータリーフィーダによる止水性と連続排土の確保
(2)方式 (土圧バランス型加水式)	①排土調整槽に加えた加水圧により、地下水圧とのバランスを図るとともに、切削土砂の流動性の確保 ②面板による山留め効果 ③チャンバー内に滞留した土砂によるカッタースリットを介しての山留め効果
(3)方式 (高濃度泥水加圧式)	①高濃度泥水の加圧による切羽の安定と、物性による切削土砂の流動性の確保 ②面板による山留め効果 ③ロータリーフィーダによる水密機構
(4)方式 (加泥式)	①作泥土材や泥漿をチャンバー内に注入加圧し、攪拌して切削土砂を泥土、泥漿に変換する機能 ②泥土、泥漿圧による切羽の安定 ③チャンバー内の土圧の検知、確認による掘進制御

しかしながら、これらの各種の工法・方式の開発は、泥土加圧式シールド工法の特許に示されるマシン装備と掘進制御による一連の流れが、この工法を適用する場合の掘進管理の根幹を形成していることの認識の普及と管理手法の明確化を阻害する一因となってきた。

このため、最近のシールドのほとんどが泥土加圧シールド工法により施工されてきている現在においてすら、現場技術者により切羽安定機構や施工管理方法について多様な捉え方があり、一部混乱が見られる原因となっているものと考えられる。

3.3 施工における異常事象の発生

3.3.1 シールド施工におけるトラブルと課題

シールド工事は機械や掘進の資機材に加えて掘進管理が非常に重要である。特に泥土圧シールド工法においては掘削した土砂と排出土砂とのバランスを図りながら過剰な掘削を防ぐことに管理の主眼を置いて切羽の安定を保つとともに、チャンバー内泥土圧は地山変位を許容値内に収めるように適正に保つ施工管理が必要である。そのため掘削の実務に従事する現場責任者は、豊富な工事の経験をもととして、自らの「掘削管理技術」を反映したマシン装備と施工情報データを管理するシステムを構築して、マシンとシステムを使い

こなすことが必要である。

しかしながら、泥土圧シールド工事で地山陥没事故が後を絶たない。筆者の身近な事故として、①平成12年3月には横浜市域での地下鉄道工事で交通頻繁な道路が陥没し、走行中の車両が落ち込む事故があった。さらに、②平成12年4月には名古屋市域での地下鉄道工事で鉄道法面が陥没し列車運行を阻害する事故が発生した。それぞれの主原因は、いずれも緩み土被りによる泥土圧を設定していたこと、さらに①では泥土の不透水性が不十分で地下水が浸入し、泥土圧が低下したこと、②では泥土掘進量に応じた排土量のバランス制御が崩れたことなどにより地山の異常な変位・変形を引き起こしたことによるものである。

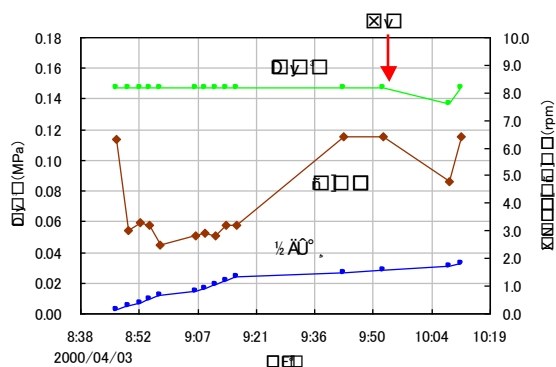
比較的安全性が高いと考えられている泥土圧シールド施工において、このような事故を回避するためには、泥土圧シールド施工に伴う切羽の安定機構と地山応力状態の変化に影響を及ぼす支配的要因を探求するとともに、地山の変位を極力抑止するための施工管理のあり方を明らかにする必要がある。



①事例 道路陥没



②事例 鉄道盛土陥没



②事例 掘進情報

②事例の推定原因

- ・ 8cm 毎の掘進情報を時刻歴にして表示
- ・ 鉛直中間位置の泥土圧を一定にする自動制御
- ・ 地山崩壊傾向で泥土圧の上昇を検知して排土量が増加
- ・ 掘進ストローク（掘削土量）と排土量のアンバランスにより、陥没

図 3-1 泥土圧シールド施工における地表陥没事例

3.3.2 泥土圧シールド工法の掘進管理と課題

(1) 掘進管理の基本

泥土圧式シールドが施工される場合に、一般的に採用されている掘進管理に関する基本的な管理項目とそのために必要な計測機器および掘進情報と地山挙動計測を総合的に判断する手順について図3-2に示す。

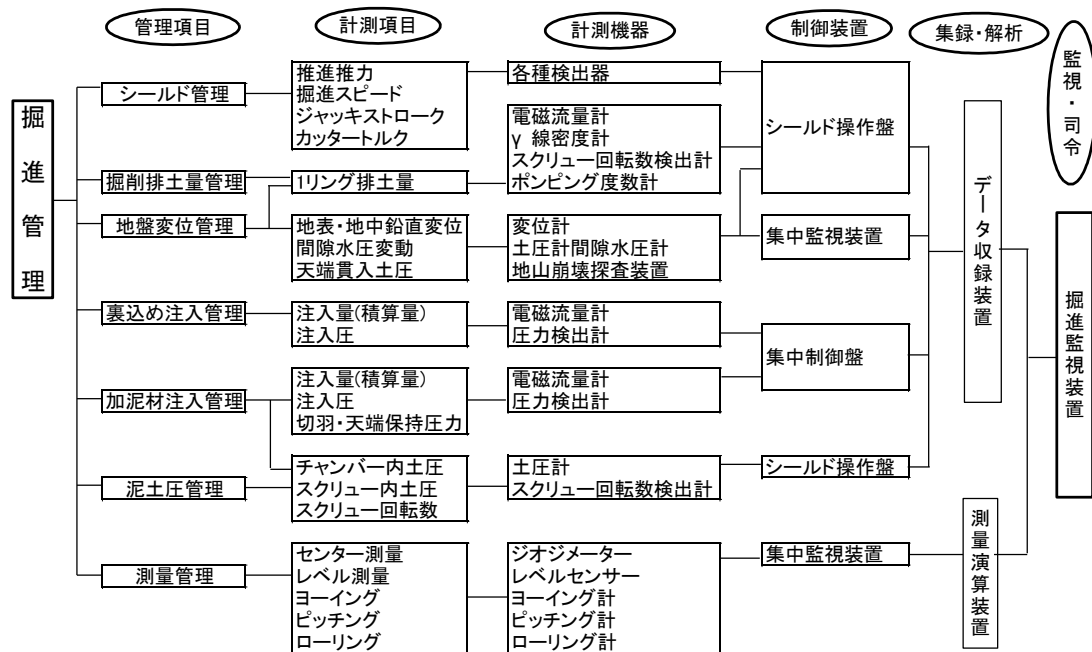


図3-2 泥土圧シールドにおける掘進管理の基本フロー

実際のシールド掘進管理においては、この手順を基本として、それぞれの施工上の制約条件による課題を考慮して、特に注意すべき事項が検討される。例えば、周辺地盤への変位抑止が厳しい条件とされている場合には、次のような点が検討される。なお、それぞれは単独でなく相互に関連を有する管理が行われることになる。

- ① 切羽での応力解放抑止への対処としての掘進管理
 - ア) 切羽土圧管理
 - イ) 排土量管理（添加材注入管理，土砂性状）
- ② 施工に伴うテールボイド，オーバーカット等の物理的空隙への対処としての掘進管理項目
 - ウ) 裏込め注入管理

なお、裏込め注入管理に関して、その注入方式は、シールド径が概ね5m以上の場合には、同時注入方式が採用され、地山条件に応じた注入量や注入圧、注入材料の選定など、その施工と管理方法は既に確立されたものであり、本論文における施工管理の課題項目と

しては特に取り上げないものとする。

つぎに、通常の施工管理において、特に重要と考える泥土と泥土圧管理について具体的事例を踏まえて、その管理と施工上の問題点を下記に述べる。

(2) 掘進開始時の泥土圧の設定

シールド施工の計画策定段階においては、掘削計画の検討と連動してマシンの設計を行うこととなるが、その場合において標準示方書・設計施工指針類^{※3)}はもとより、類似地山条件における施工実績等を踏まえるとともに、当該工事区間の地山条件により、周辺建物等による地山変位の許容値等を考慮して掘削開始時の泥土圧の管理目標値を仮に定めることになる。

具体的には、まず鉛直土圧の算定については、地層構成と地山性状により、緩み土被りか全土かぶりかの判断が必要であり、地下水圧については土水一体か分離かを検討するとともに、水平土圧については主働土圧係数と静止土圧係数を考慮して算出することになる。

掘進開始前の計画策定時点においては、地山の土水圧の状態は不明確であることから、発進時に地山掘進に入る過程において、チャンバー内の泥土圧状態を早期に把握して、掘進前に仮に設定した泥土圧の妥当性の照査に努めなければならない。

特に泥土圧シールドにおいてはチャンバー内を泥土で充満にして掘進することから、泥土圧を低く設定する方が、高い場合に比較すると効率的に掘進が行えることは実態であるが、地山土水圧の変動の把握に加えて、地盤変位が予測値以内であるか否かについて、掘進時に繰り返し分析を行い、適正なチャンバー内泥土圧を確保するよう掘進・排土制御とリンクさせながら検証しなければならない。すなわち、掘進前に仮に設定した泥土圧が適切なものであろうとして漫然とした掘進を続けると、「緩み土被り×主働土圧係数」とした場合などには、地山切削により取込み量が増加して地盤の陥没を引き起こす危険側の施工をしているとの認識を持つことが不可避である。

(3) 泥土圧の適切度の判断

泥土圧が適切であるか否かの判断は実施工においては困難なものである。泥土圧は地山から土水圧が作用する場合には、受動圧力（塑性圧力）として敏感に反応することから適切性の判断がある程度可能であるが、地山からの土水圧が直ちに作用しない場合には泥土圧の過不足の判断は、地山変位の計測により行うことが必要となる。

特に土被りが薄く、硬質地山でない場合には、泥土のチャンバー内での充填程度や泥土の性状が地山変位に敏感に影響を及ぼすことになり、地山物性や施工時要件に応じて予測した変位との照合・精査が重要である。

近年、前述のとおり裏込め注入技術の進歩により、良好な掘進管理の下においては掘削による地山変位は、益々小さく抑止できるようになってきている。そのため、予測した変位との照合を行う場合においても、「適切な技術による掘進管理を前提とした応力解放率を

概ね10～15%程度」として地山変位を予測して、設定した泥土圧の妥当性を検証することになる。

しかし、ここにも課題がある。地山変位を推定する基本条件として、「シールド施工に伴う応力解放率は、長年にわたる施工実績を踏まえて、従前から用いられている35%程度となる」と認識した場合には、その照査目安とする地山変位量には2～3倍の違いが生じる。

例えば、変位係数が30kN/m²程度の砂地山において、土被り1D程度の単線シールドの掘削においては、地表沈下予測値は概ね4～5mm程度と予測すべきものが、解放率の考え方の相違により約8～10mm程度でも妥当な施工状態にあると判断してしまいかねない事態が生じる。

砂礫質地山で土被り15mでの地表沈下が10mm程度の沈下計測値を妥当なものとして、その危険性を看過した上記3.3.1に示した陥没事例②が特徴的であり、地山性状に応じた地盤の破壊状態への接近度に関する管理が欠落すると地山の異常な変形や陥没を生じることになる。

(4) 掘進開始時のチャンバー内充填と泥土性状の確保

掘進開始時における地山の異常な変形を生じた事例の原因を探ると、

- ① 発進直後であり泥土圧が確保できていない状態で掘進したため、チャンバー内の充填が不十分であり、さらに掘削土砂の泥土化が適切でなかった。
- ② 発進防護工の範囲がマシン長に比較して短かったため、泥土の止水性が不十分な状態でチャンバー内に地下水が浸入したが、特段の対処をせずに掘進を続けて、排土時の噴発により地山の陥没に及んだ。
- ③ 複層地山への掘進時に、地山強度が掘削断面の上下で異なっていたことにより、チャンバー内への取込が均等でなく、泥土圧が安定しなかった。
- ④ 泥土圧が急激に上昇したが、泥土圧を設定範囲内に制御する自動システムにより排土量が掘削土量より極端に多くなった。

など、泥土圧シールド工法の基本原理が確保されずに掘進したことにより地山陥没などに及ぶ場合があり、掘進時において、その兆候を把握して適切な対処がなし得ないところに、掘進管理の困難性が現われていることが確認される。

具体的には、

- a: 掘削土砂でチャンバー内を充填させること
- b: 切削する地山土砂が円滑にチャンバー内に入り込めるようにすること
- c: 掘削土砂と注入した添加材の攪拌混練により塑性流動化を確実にすること
- d: カッターとの共回りを起こしたり隔壁に付着しない
- e: チャンバー内の泥土をスクリーコンベヤーにより円滑に排土できること
- f: 掘進土量に応じて排土量を制御することにより適切な泥土圧を確保すること
- g: 排土した泥土が分離状態に無いこと

等の泥土圧シールド工法の基本原理を守ることが確実に実行されない管理状況において異常な地盤変形が発生している。

これらは泥土圧シールド工法の特有な原因であり、次に述べる泥水式シールド工法の施工管理とは異なる管理技術により、異常事態の想定と対応策が掘進開始前に具体的に十分検討されていない。

千葉県流山市域における鉄道トンネル建設に際し、帯水砂層での直径 10m の泥土圧シールドの施工時に、開削立坑から掘進開始直後にチャンバー内泥土に地下水が浸入した事例を図 3-3 に示す。立坑から地山への掘進開始直後の発進防護工内において、防護工の止水性が不十分であり、かつ発進直後であったことから、チャンバー内泥土も所要の性状を十分に確保できない状態において、地下水がチャンバー内に浸入してきたものである。

泥土圧が前のリング時より急に低下しており(a 点)、あわせてカッタートルク値の急激な低下が確認できる。なお、本掘進情報においては、掘進停止中の記録が残されていないことから、停止中の状況は確認できない。

管理技術者は、掘進情報により本事象の発生を確認することができたことから、対応策として、排土を停止し、ジャッキ推力の操作によりマシンを前進させて、図に示すとおり、泥土圧を急激に上昇させることにより、地山がチャンバー内になだれ込んで地表が陥没に至ることを抑止阻止することに成功したものである(b 点)。その後、事態を回復させて円滑に掘進を進めている時の状況を図 3-4 に示す。

両図を比較すると、泥土圧およびカッタートルクの変動の差異を明確に認識できる。なお、図中のストロークについては、1 リング=1.5m 分について、掘進速度に応じたジャッキストロークの伸張毎の掘進の進捗を示している。おりなお、その尺度目盛は図に表示していない。

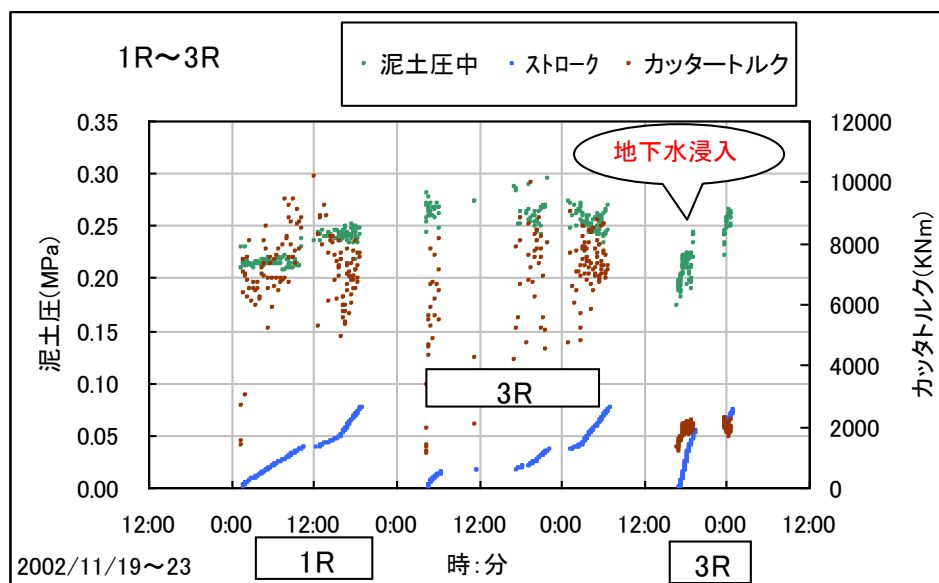


図 3-3 掘進開始直後の地下水浸入

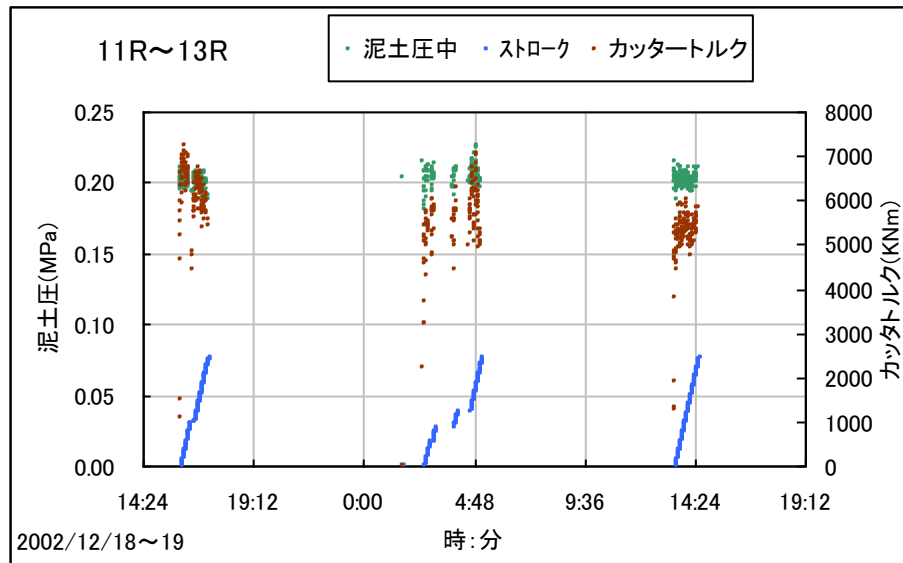


図 3-4 回復後の円滑な掘進

(5) 掘進管理の混乱の根幹

泥土圧シールドの施工技術者によっては、「泥土と泥水の役割はほぼ同じであり、シールド施工においては、それぞれの圧力管理が最も重要である」との認識がある。

泥土圧シールドでは切羽安定に泥土を用いるが、泥水式シールドにおける泥水とは、切羽での地山への作用機構は全く異なるものであり、掘進管理の指標としては同じ概念で取り扱うことはできない。

泥水式シールドでは掘進中および掘進停止中に泥水圧が変動したり、地下水位より低下するとほとんどの場合は地山が動き、チャンバー内に土砂が崩落してくることから、掘進中、停止中にかかわらず泥水圧の維持と逸泥防止を施工管理を重要な指標として適正に所要の値を保つように送排泥システムを管理し制御することが地山の安定のために重要な要因となる。

しかしながら泥土圧シールドでは、(3) に述べたように、泥土性状と泥土圧力を維持するための総合的管理が求められる。

また泥水式シールドにおけるチャンバー内泥水は、掘削土砂を取り込んで単位体積重量が 13 kN/m^3 前後であり、限りなくニュートン流体に近い性質を持っており、チャンバー内は比較的均質で圧力伝達も直線的になる。しかしながら、泥土圧シールドにおけるチャンバー内の泥土は単位体積重量が $16 \sim 18 \text{ kN/m}^3$ 程度で、その流動特性は、圧力と攪拌を受けることにより流動性を示す、いわば「ビンガム流体に近い性状¹⁴⁾」を示しており、チャンバー内は、地山の単位体積重量に近い場合によっては地山の単位体積重量以上の泥土で満たされているために、泥水式シールドで言えば、地山がチャンバー内に落ち込んで土砂で埋没した状態になっているとも言える点に多いなる相異がある。

その観点に立つと、泥土圧が多少変動しても、異常な排土をしなければ、地山土砂が一気にチャンバー内に流入することは殆どないとの考え方に至ることになり、掘進管理の原点であるとの捉え方が必要である。ここに、泥土圧シールドにおける掘進機構と泥土の役割に関して、この認識の相違が掘進管理の混乱の根幹となり、重点を置くべき掘進管理のポイントと掘進制御の方法が異なり、時として誤った管理につながることになる。

3.4 結論

本章では、シールド工法の開発の経緯を整理することにより、土圧式シールド工法の施工管理は、経験則に頼る部分が多い工法であり、掘進情報の把握～地山挙動の計測～技術者経験の三位一体により成り立つ工法であることを明らかにした。

次に、各種の泥土圧シールド工法の開発経緯から、現在多用されている泥土加圧式シールドの基本原理の認識が曖昧になっており、それが一因となって地表陥没に至った事例もあわせて示した。

さらに、最近の泥土圧シールド施工に関する一般的施工管理手順とその方法を示すとともに、泥土の圧力設定、圧力管理、求められる性状、役割について概括することにより、管理技術者が実際の施工に際して、明確に認識できる掘進管理のあり方を具体的に解明することにより、提示することが必要であることを示した。

参考文献

- 1) 菅達彦：英雄時代の鉄道技師たち・技術の源流をイギリスにたどる，山海堂，pp. 134～146. 1987. 4
- 2) シールドトンネルの新技术連載講座編集小委員会：シールドトンネルの新技术(1)～(26)，トンネルと地下，1990. 6～1992. 7
- 3) 塚田章ほか：シールド工法の実際，鹿島出版会，1980. 11
- 4) 栗原和夫：泥水加圧シールド工法，鹿島出版会，1982. 7.
- 5) 佐々木道夫：土圧系シールド工法，鹿島出版会，1982. 7
- 6) IHI-SP シールドの概要，石川島播磨技報，第15巻第6号，1975. 11
- 7) 林茂樹，玉野井峻，桧皮憲男：各種計測機器管理による土圧式シールド工法の施工報告，建設機械，1978. 3
- 8) 玉野井峻：最近の“土圧式シールド”の現実問題と具体策・その3 土質上からみた各種施工実績の問題点と具体策，日本プロジェクトリサーチ，1979. 3
- 9) 加島豊，杉江哲也：泥土加圧シールド工法の紹介と実績，トンネルと地下，第8巻7号，1977. 7
- 10) 加島豊：最近の土圧系シールド・泥土加圧シールド工法 — 切羽安定に関する2, 3の考察，日本プロジェクトリサーチ，pp. 39～57, 1984. 4.
- 11) 佐々木道雄：土圧系シールド工法，pp8-14，鹿島出版会，1982. 7.
- 12) 栗原宏武ほか：滞水砂，砂礫層を対象とした土圧シールド工法(泥漿シールド工法)の開発研究(その3)，鹿島技術研究所報，1984.
- 13) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド編)・同解説，p18，1988. 6.
- 14) 佐々木加津也，清水賀之，西田昭二：大断面土圧式シールド掘進機チャンバー内土砂挙動シミュレーション，土木学会年次学術講演会講演概要集第3部(B)，Vol51巻，304-305頁，1996

第4章 切羽周辺地山の挙動

4.1 はじめに

本章では、土圧式シールド工事が行われた現場で計測された掘進管理情報と周辺地山の挙動計測結果をもとに、実際の現場で発生している地山挙動を明らかにする。さらに、得られた特徴的な地山挙動と掘進管理に重要な現象の発生のメカニズムを、掘進管理情報と有効応力の原理に基づく地山特性から推論する。

4.2 分析対象トンネルの概要と施工管理

4.2.1 常磐道トンネル¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

(1) 位置

常磐道トンネルは、常磐新線（つくばエクスプレス：秋葉原・つくば間延長約 58.3km）のうち、秋葉原起点約 46km 付近に位置し、常磐自動車道直下を約 1D の小土被りで交差（平面交差角約 22 度）する、延長 303m、セグメント外径 7.3m の単線並列シールドトンネルである。本トンネルは土圧式シールド工法により、起点方の発進立坑と終点方の回轉立坑との間を離隔 2.0m で U ターン施工して構築したものである。常磐道トンネルの平面図を図 4-1 に、トンネルの概要を表 4-1 (1) に示す。

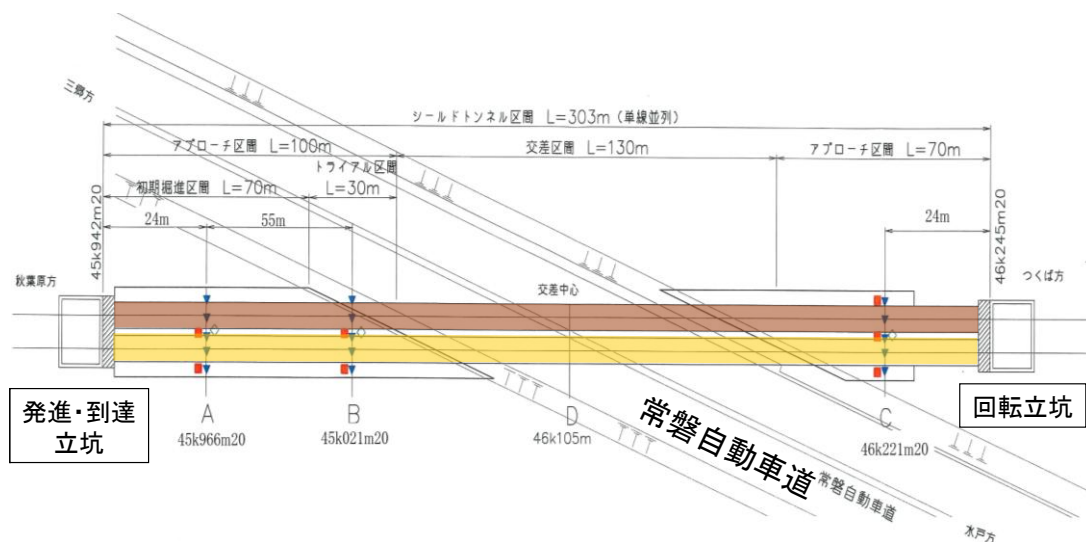




図 4-1 常磐道トンネル平面図

表 4-1(1) トンネルの概要 (常磐道T, つくばT, 南流山T)

	常磐道トンネル	つくばトンネル	南流山トンネル
シールド形式	土圧式シールド	土圧式シールド	土圧式シールド
シールド外径	7.45m	7.45m	10.2m
カッターヘッド			
ジャッキ総推力	48,000kN	52,000kN	88,200kN
延長	303m×上下2本	上り線 899m 下り線 907m	655m
単線・複線	単線並列 (離隔 2.0m)	単線並列 (離隔 発進立坑部 346mm 到達立坑部 294mm)	複線
最小曲率半径	直線	R=600m	R=400m
最急勾配	5.5‰	35‰	35‰
セグメント外径	Do=7.3m	Do=7.3m	Do=10.0m
セグメント構造	RC セグメント (幅 1.5m, 厚 30cm)	RC セグメント (幅 1.5m, 厚 30cm) タイルセグメント (幅 1.2m, 厚 30cm)	RC セグメント (幅 1.5m, 厚 40cm)
土被り	0.5D (押え盛土) ~1.0D	0.9D~1.9D	0.8D~2.2D
地盤条件	洪積砂質土層 (Ds3-1) (成田層) ゆるい帯水砂層 N 値 5~10 以下	洪積砂質土層 (Ds2L) 帯水細砂~中砂主体 (竜ヶ崎層) N 値 5~50 以上	洪積砂質土層 (Ds4) N 値 3~50 以上 洪積粘土層 (Dc4) (成田層)
地下水位	G.L-1.2m	G.L-5m~-6m	G.L-1.5m~-3m
現場条件	常磐自動車道直下の横断 (土被り 6.8m~7.5m, 交 差延長 130m, 交差角 22 度) 小土被り (0.5D~1.0D)	超近接構造 (最小離隔 294mm) 生活井戸が多数近接 共同溝に近接 (離隔 3.9m) 小土被り (0.9D~1.9D)	総武流山電鉄直下の横断 (土被り 1.2D) 高圧ガス管に近接 (離隔 1.8m) 下水道管に近接 (離隔 2.1m)

(2) 地質

トンネル断面の地質は、N 値 5~10 以下の比較的緩くほぼ飽和した成田層の洪積砂質土層(Ds3-1)が主体をなしている。その上層には凝灰質粘土層 (tc: 一軸圧縮強度 98kN/m²) が分布し、さらにその上部には高速道路の盛土層(B)が重なっている状態にある。また、地下水位はシールド中心位置から 4~6m 上方 (G.L-1.2m) と高い。土被りは高速道路交差部で約 7m(1D)、アプローチ部で約 4~5m(0.5D)であり、全区間で 0.5D~1D 程度の小土被りである。常磐道トンネルの縦断図を図 4-2 に示す。

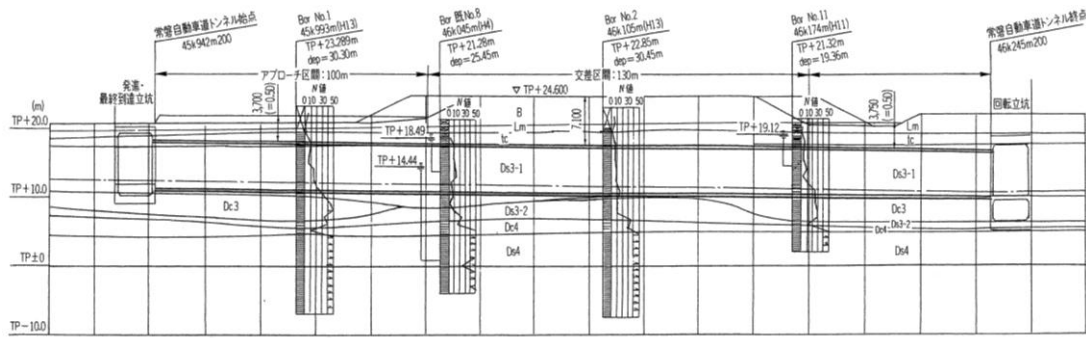


図 4-2 常磐道トンネル縦断面図

(3) 実施計測内容

常磐道トンネルは、常磐自動車道の直下を小土被りで掘進することから、最適な掘進管理値を設定するために本掘進の前にアプローチ区間を設けた。また、路面への影響を極力抑えるために計測結果を速やかに掘進管理にフィードバックするようにした。

図 4-3 は図 4-1 での計測点 A～D におけるシールド直上 2m に設置した地中沈下計，先行シールドのセグメント背面部に設置した土圧計，水圧計，および両シールド中間の SL 高さでの間隙水圧計の位置を示したものである。また，水平傾斜計は，左，センター，右の 3 測線で上端部を TP+19.5m として鉛直方向に 2m ピッチで測点を設置した。各計測点の発進立坑からの距離は，A 点=24m，B 点=79m，D 点=163m，C 点=279m である。

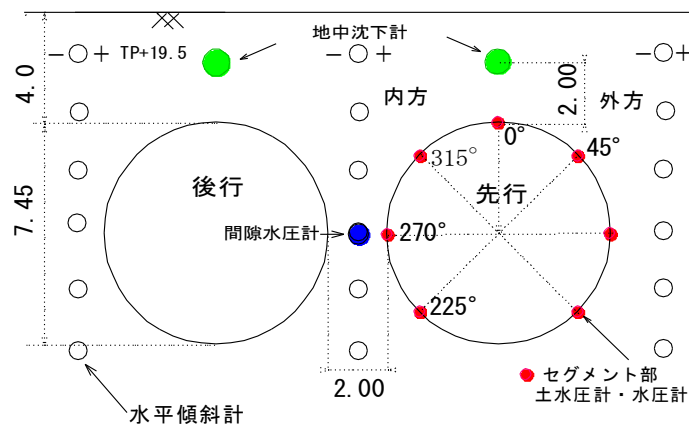


図 4-3 計測器の設置位置（常磐道トンネル）

4.2.2 つくばトンネル⁵⁾⁶⁾⁷⁾

(1) 位置

つくばトンネルは、常磐新線（つくばエクスプレス）終点のつくば駅手前に位置する延長約 900m，セグメント外径 7.3m の単線並列シールドトンネルである。本トンネルも常

磐道トンネルと同様に、起点方の発進立坑と終点方の回転立坑との間を土圧式シールド工法による U ターン施工で構築したものである。離隔は発進立坑部で 346mm，回転立坑部で 249mm という超近接構造となっている。さらに、トンネル周辺には生活井戸が多数存在するとともに、共同溝とも離隔 3.9m で近接する現場条件のため、これらの近接構造物に対する影響の検討も必要であった。つくばトンネルの概要図を図 4-4 に示す。またトンネルの概要は表 4-1 (1) に示したとおりである。

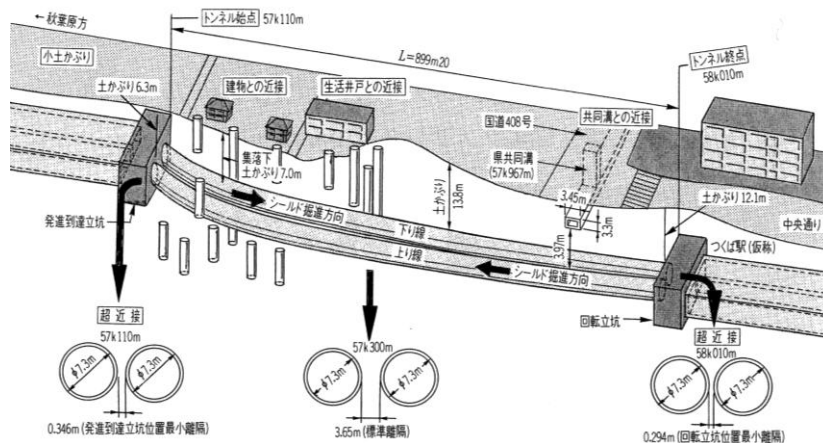


図 4-4 つくばトンネルの概要

(2) 地質

トンネルの位置する地質は竜ヶ崎層の洪積砂質土層(Ds2L)で、N 値は 5~50 以上の値を示す。粒径が均一(均等係数 5 以下)で細粒分含有率 20%以下であり、切羽の自立性に乏しい地山である。また、被圧地下水が帯水し、地下水位はシールド中心位置から 7~14m 上方(G.L.-5m~-6m)である。土被りは 0.9D~1.9D であり、全線にわたって小土被りである。つくばトンネルの縦断図を図 4-5 に示す。

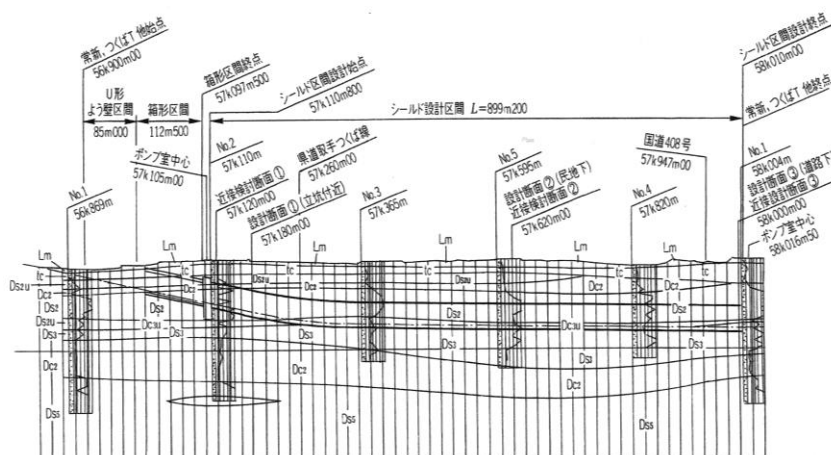


図 4-5 つくばトンネル縦断図

(3) 実施計測内容

つくばトンネルは民家および共同溝直下での掘進であり、沈下を最小限に抑える必要があった。シールドが発進してから民家直下に至るまでの 33m 区間についてトライアル掘進を行い、地盤の変位計測結果を反映して、極力地山に影響を及ぼさない管理値を設定した。本掘進ではトライアル掘進の結果から決定した管理値をもとに掘進管理を行い、計測値はフィードバックして管理に反映させた。

発進立坑と到達立坑付近に各 2 断面の合計 4 断面に傾斜計および層別沈下計を設置して地盤変位計測を行っている。さらに民家および共同溝の直下に水盛式沈下計を設置して近接構造物の変位を計測した。

図 4-6 は分析に用いる計測断面 (57km125m) における計測機器の設置位置を示したものである。

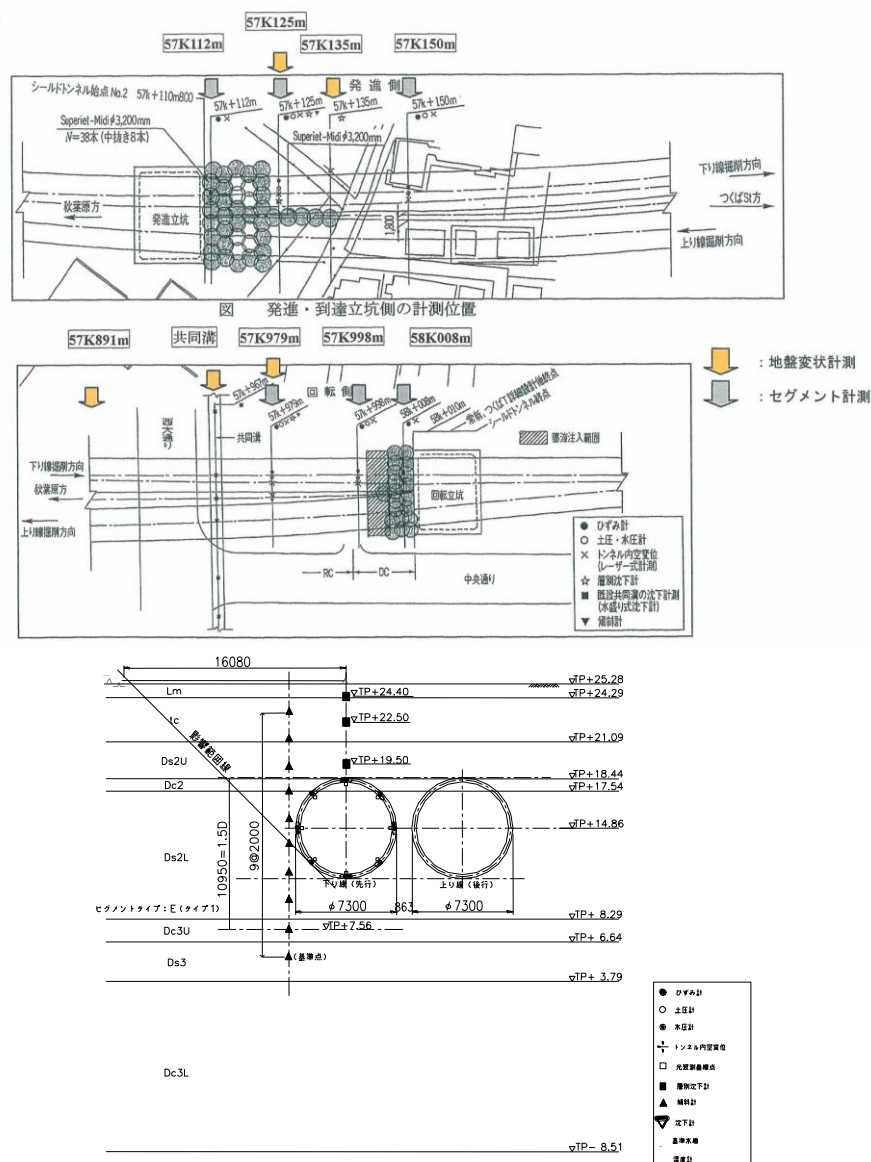


図 4-6 計測計器の設置位置 (つくばトンネル)

4.2.3 南流山トンネル⁸⁾⁹⁾

(1) 位置

南流山トンネルは、常磐新線（つくばエクスプレス）南流山駅（千葉県流山市）の終点方に位置する延長 655m、セグメント外径 10m の大断面複線シールドトンネルである。本トンネルはシールド機外径 10.2m の土圧式シールド工法で構築した。

土被りは 0.8D～2.2D で、交通量の多い流山市道 106 号線下を通過し、終点方で総武流山電鉄線の直下を土被り 1.2D で横断している。また、高压ガス管（φ600mm）や北千葉広域水道とも離隔約 2m で近接する施工となった。南流山トンネルの平面図を図 4-7 に示す。またトンネルの概要は表 4-1 (1) に示したとおりである。

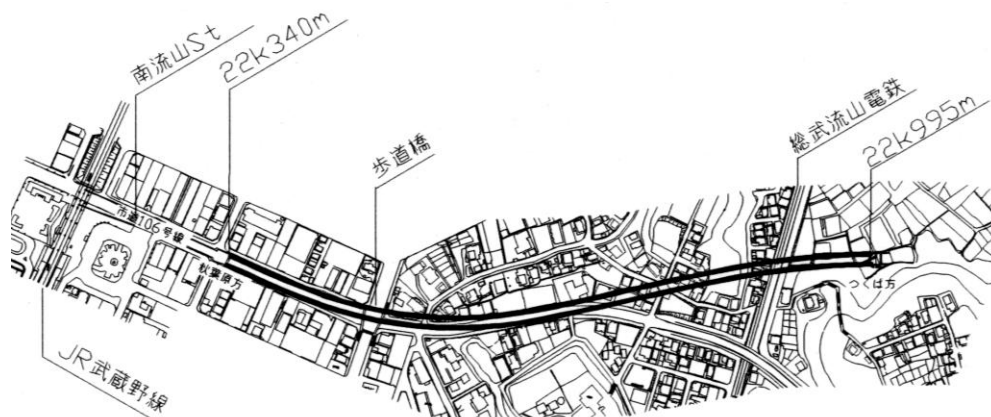


図 4-7 南流山トンネル平面図

(2) 地質

トンネルの位置する地層は成田層の洪積砂質土層(Ds4)が厚く分布し、この Ds4 層中に連続性の良い粘土層(Dc4)が水平に分布している。砂質土層(Ds4)の N 値は 3～50 以上の値を示し、平均の N 値が 50 以上の固く締まった地盤である。また、地下水位はシールド中心位置から 0～11m 上方(G.L-1.5m～-3m)である。トンネルの縦断図を図 4-8 に示す。

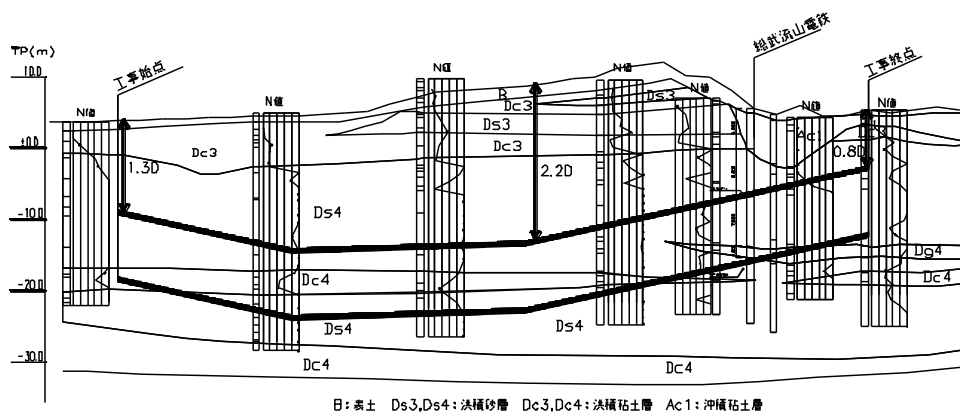


図 4-8 南流山トンネル縦断図

(3) 実施計測内容

南流山トンネルは交通量の多い市道、民地および営業線（総武流山電鉄）の直下を掘進することから、地盤の沈下抑制を重視した掘進管理および計測管理を計画した。初期掘進区間においてトライアル掘進を行い、必要に応じて各管理項目の管理値の再設定を行っている。

初期掘進区間では層別沈下計、沈下板およびシールド直上に沈下棒を設置し、本掘進区間では層別沈下計と沈下棒を設置した。さらに本掘進区間ではシールド直上と左右の地表面にも沈下量の測定点を設け計測を行っている。また、総武流山電鉄との横断部では、軌条にミニプリズムを設置し、トータルステーションによる60分ごとの沈下計測を行った。

トライアル施工区間（22km380m）および総武流山電鉄横断部における計測機器の設置位置を図4-9に示す。

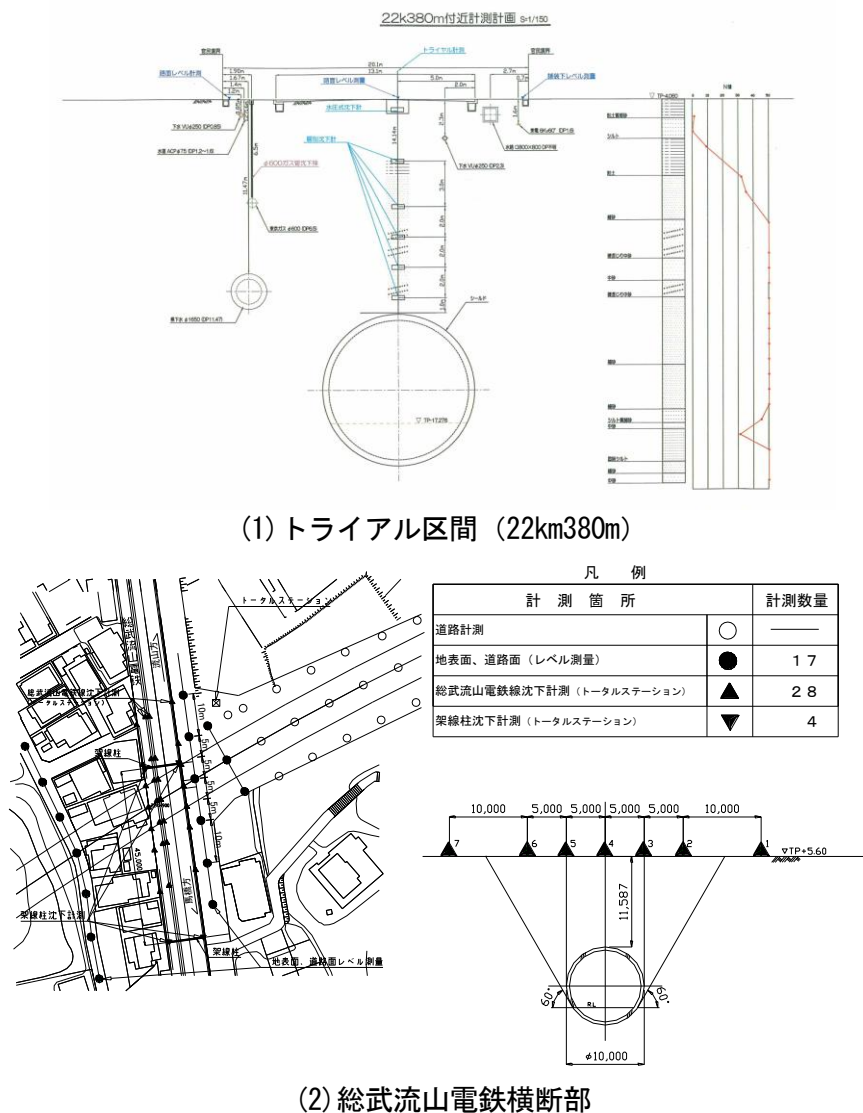


図4-9 計測計器の設置位置（南流山トンネル）

4.2.4 瀬古トンネル¹⁰⁾

(1) 位置

上飯田連絡線は、名古屋市北部に位置し、名古屋鉄道小牧線味鉢駅と名古屋市営地下鉄名城線平安通駅を結ぶ延長約 3.3km の地下新線である。

瀬古トンネルはこのうち、味鉢方開削トンネルを発進立坑とする南行線（延長 1,592m）および上飯田方開削トンネルを発進立坑とする北行線（延長 1,454m）からなる単線並列シールドトンネル（セグメント外径 7.0m）であり、土圧式シールド工法による対向掘進で施工したものである。

本トンネルは営業線（名鉄小牧線）直下および民地下を通過するとともに一級河川庄内川・矢田川を横断するルートとなっている。瀬古トンネルの平面図を図 4-10 に、トンネルの概要を表 4-1 (2) に示す。

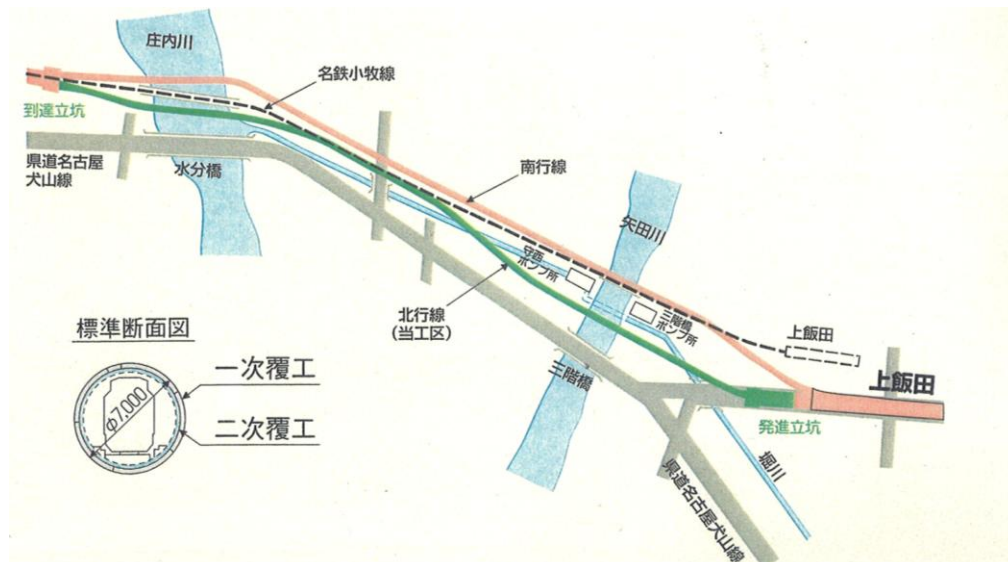


図 4-10 瀬古トンネル平面図

(2) 地質

トンネル断面での地質は、海部・弥富累層の洪積砂礫層(Dmg1)とが大部分を占め、中間付近において下半部に洪積粘性土層(Dmc2)が現れる。Dmg1 層は連続性が良く N 値は平均 50 以上を示し、透水係数は $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{cm/sec}$ 程度である。礫間は砂およびシルトで充填されている。Dmc2 層は連続性が良く N 値の平均が 13 で、固い粘土に分類される。地下水位は G.L-2m~-3m 付近にある。瀬古トンネルの縦断図を図 4-11 に示す。

表 4-1(2) トンネルの概要（瀬古T, 福島シールド, 阪神シールド）

	瀬古トンネル	福島シールド	阪神シールド
シールド形式	土圧式シールド	土圧式シールド（土圧）	土圧式シールド（気泡）
シールド外径	7.15m	7.25m	10.8m
カッターヘッド	 <p>南行線</p>  <p>北行線</p>	 <p>下り線</p>  <p>上り線</p>	
ジャッキ総推力	48,000kN	45,500kN	
延長	南行線 1,592m 北行線 1,454m	879m × 上下2本	210m
単線・複線	単線並列	単線並列 (離隔 発進立坑部 2.7m 到達立坑部 1.25m)	複線
最小曲率半径	南行線 R=300m 北行線 R=400m	R=250m	R=500m
最急勾配	33‰	13.5‰	2‰
セグメント外径	Do=7.0m	Do=7.1m	Do=10.6m
セグメント構造	RC セグメント (幅 1.2m, 厚 30cm)	RC セグメント (幅 1.0m, 厚 35cm)	ダクタイルセグメント (幅 1.0m, 厚 35cm)
土被り	6m~25m	11.7m~15.9m	7.9m~9.5m
地盤条件	洪積砂礫層(Dmg1) N値 50 以上 洪積粘土層(Dmc2) N値 13	粘着力のある沖積粘性土層(Ac1) N値 2~6 沖積砂質土層(As2) N値 8~10	沖積粘性土層(Ac) N値 2~5 一部に緩い沖積砂質土層(As1) N値 5~15
地下水位	G.L-2m~-3m	G.L-1.7m~-3.3m	G.L-3m
現場条件	名鉄小牧線直下の掘進 民地直下の掘進 一級河川（庄内川, 矢田川）下の横断	国道2号線直下の掘進 共同溝に近接 (最小離隔約 1m) 共同溝の存置杭の処理 JR 大阪環状線高架橋下の横断 阪神電鉄高架部に近接	阪神高速道路の橋脚に近接 阪神本線下の横断 埋設物（上水道, 下水道, NTT 等）が輻輳 小土被り（1.0D 未満）

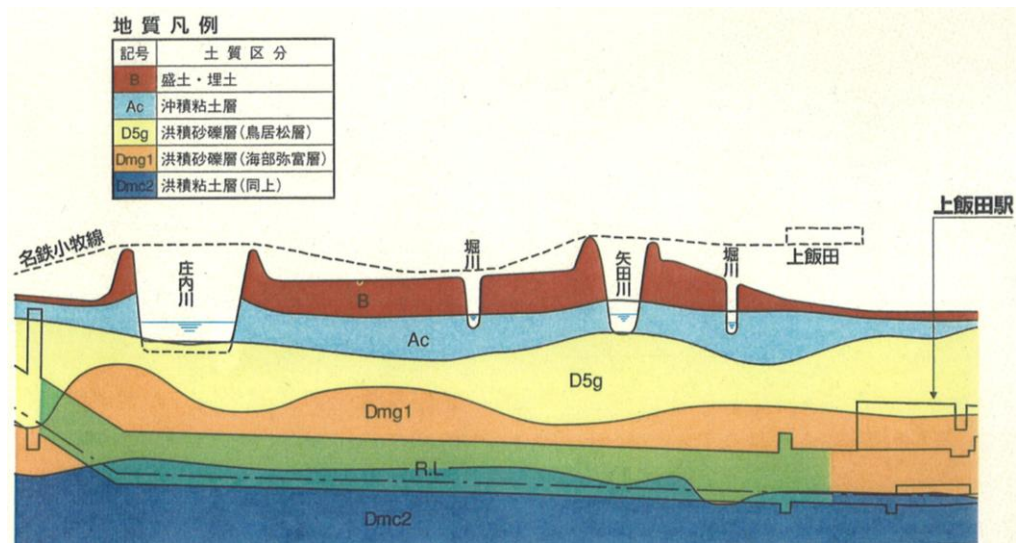


図 4-11 瀬古トンネル縦断面図

(3) 実施計測内容

シールド掘進に伴う地山挙動を観測し掘進管理項目の妥当性を検討するために、合計4断面で層別沈下計を設置して地中沈下計測を行った。さらに、シールド併設施工時の地山の挙動とセグメントの挙動を計測する目的で、2断面で層別沈下計、間隙水圧計および先行セグメントに土水圧計を設置して各種の計測を行っている。

分析に用いる計測断面(1km160m)における計測機器の設置位置を図4-12に示す。

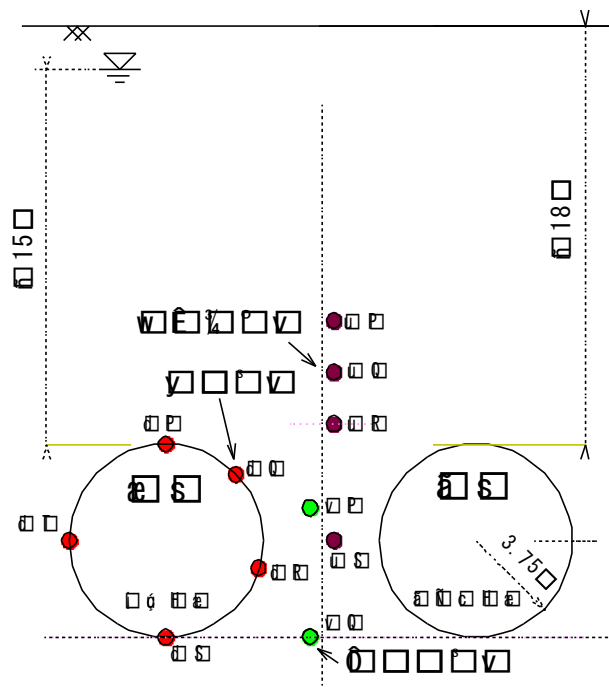


図 4-12 計測計器の設置位置(瀬古トンネル)

4.2.5 福島シールド¹¹⁾¹²⁾¹³⁾

(1) 位置

JR 東西線（片福連絡線）は、JR 京橋駅と尼崎駅とを結ぶ延長 12.3km の鉄道新線である。工事は、開削工法で新設する 7 つの駅とその駅間における 6 区間のトンネルをシールド工法で築造したものである。福島シールドは、このうち福島・野田阪神間の延長 880m、セグメント外径 7.1m の単線並列トンネルであり、土圧式シールド工法で築造した。本トンネルは、国道 2 号線直下を掘進し、JR 大阪環状線高架下を横断するとともに、阪神電鉄の高架部や共同溝とも近接する現場条件にあった。福島シールドの平面図を図 4-13 に示す。またトンネルの概要は表 4-1 (2) に示したとおりである。

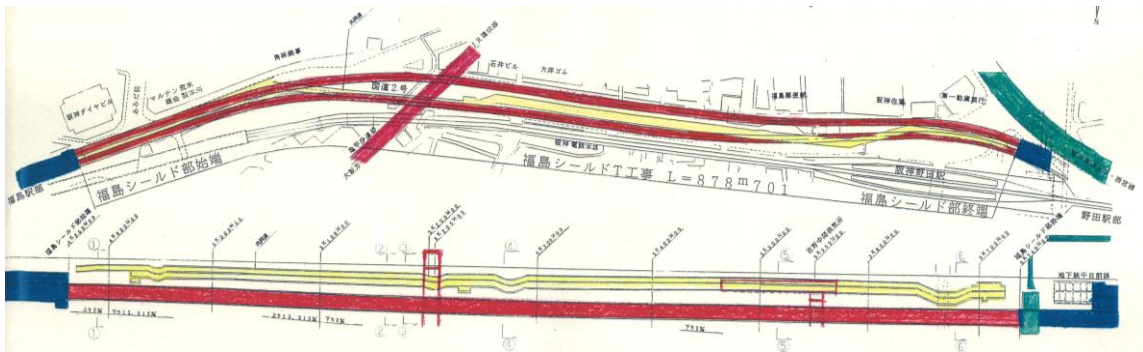


図 4-13 福島シールド平面図

(2) 地質

トンネルの位置する地層は、粘着力のある沖積粘性土層(Ac1)が主体をなし、中間部から終点方にかけて下半部に沖積砂質土層(As2)が現れる構成となっている。Ac1 層の N 値は 2 ～6 と小さく軟弱な地質である。また地下水位は G.L-1.7m～-3.3m 程度であった。福島シールドの縦断図を図 4-14 に示す。

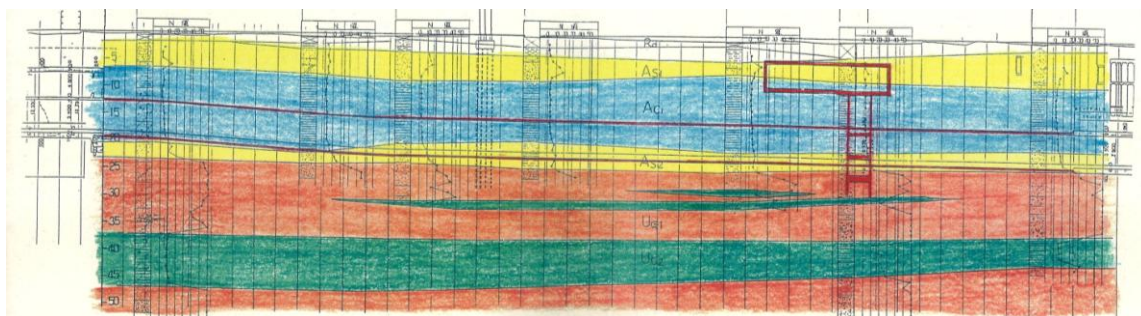


図 4-14 福島シールド縦断図

(3) 実施計測内容

トライアル施工にて各掘進管理値の設定および地山の挙動を把握するために、トライアル区間の合計4断面において層別沈下計、傾斜計、地中土圧計および間隙水圧計等を設置し、各種の計測を行った。地中土圧計については、トンネル掘削断面内に設置し、切羽到達直前までの地中土圧の変動を追跡できるようにしている。

分析に用いる計測断面（計測断面3：4km940m）における計測機器の設置位置を図4-15に示す。

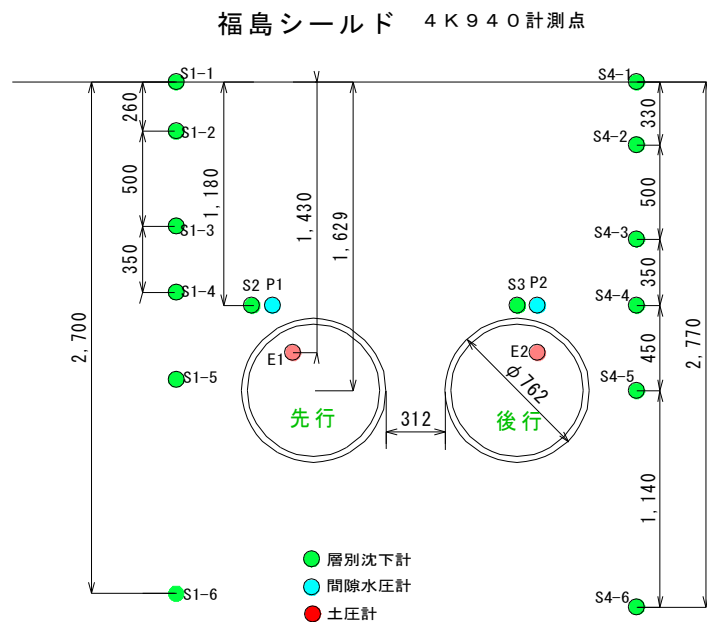


図4-15 計測計器の設置位置（福島シールド）

4.2.6 阪神シールド¹⁴⁾

(1) 位置

阪神シールドは、軟弱粘性土中を土圧式（気泡）シールド工法で築造した、延長210m、セグメント外径10.6mの複線断面トンネルである。本トンネルは、重要埋設物（下水、上水、NTT等）が輻輳する国道2号線を掘進し、阪神高速道路の橋脚に近接して、阪神本線下を横断するルートであった。阪神シールドの平面図を図4-16に示す。またトンネルの概要は表4-1(2)に示したとおりである。

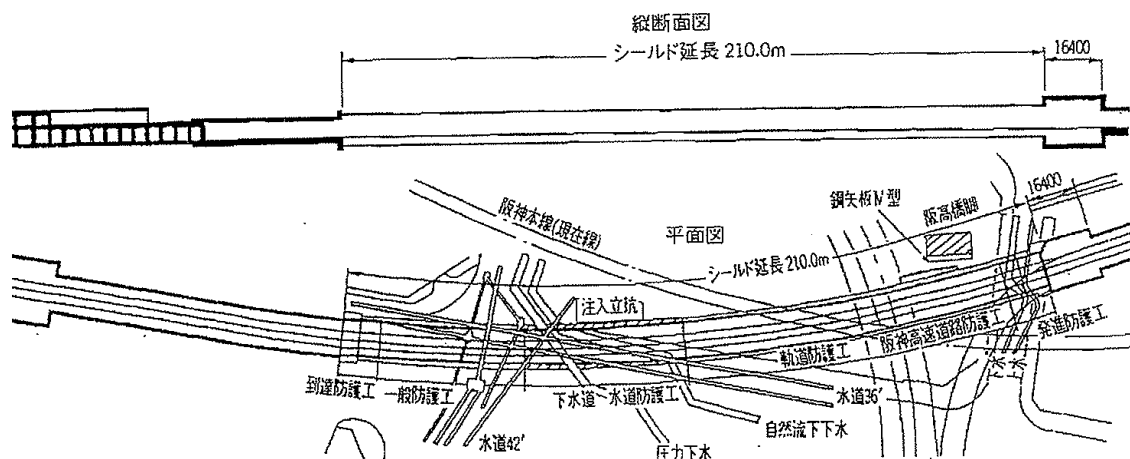


図 4-16 阪神シールド平面図

(2) 地質

トンネルの土被りは7.9～9.5mで、トンネルのほぼ全面にわたり沖積粘性土層(Ac)が現れる。この地層は梅田粘土層と呼ばれる貝片を多く含む海成粘土層であり、N値2～5の軟弱な粘性土である。シールド上部に一部現れる沖積層の第1砂質土層(As1)は細～中砂で腐植物を混入しN値5～15の全体的に締まりの緩い層である。沖積層のすぐ下には透水性が極めて大きく被圧水位の高い天満砂礫層が存在する。阪神シールドの縦断面図を図4-17に示す。

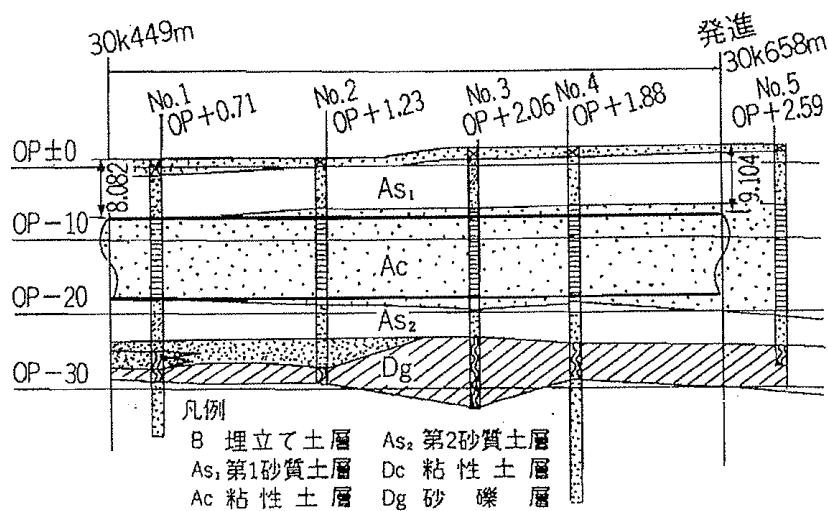


図 4-17 阪神シールド縦断面図

(3) 実施計測内容

シールド掘進に伴う地山挙動を把握するために、合計4断面で層別沈下計、傾斜計、地中土圧計および間隙水圧計等を設置し、各種の計測を行った。間隙水圧計については、トンネル掘削断面内に設置し、切羽到達直前までの間隙水圧の変動を追跡できるようにしている。

分析に用いる計測断面（B 断面：30km610m）における計測機器の設置位置を図 4-18 に示す。

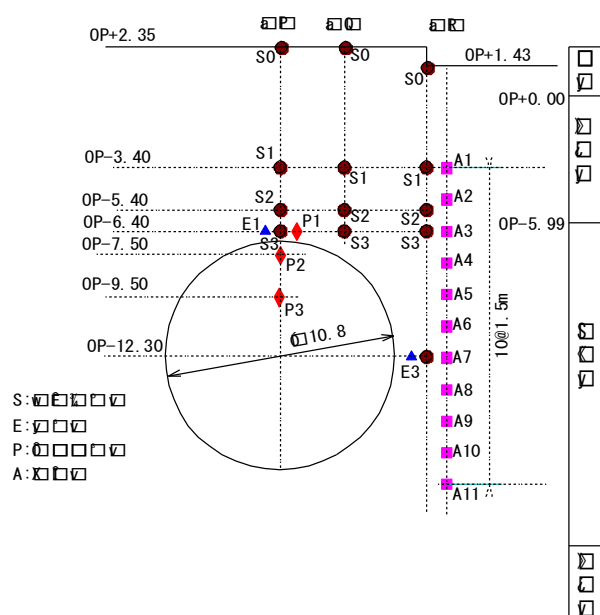


図 4-18 計測計器の設置位置（阪神シールド）

4.3 地山挙動と掘進作用力

4.3.1 地山挙動計測

4.2.1 に示す帯水洪積砂層で施工した常磐道トンネルにおいて計測された地山挙動を下記に示し、シールドの掘進と停止が地山の変位・変形に及ぼす影響について考察する。

本トンネルは、図 4-1 に示したように、高速道路と 170m にわたって交差し、その前後のアプローチ部が 130m で、施工延長約 300m の複線鉄道トンネルである。マシン一機により、まず先行シールドを施工し、その後先行シールドに約 2m の離隔で近接して後行シールドを U ターン施工したものである。

(1) 各種計測機器の設置

図 4-19、図 4-20 に C 計測点（図 4-1 参照）において設置した地山挙動計測機器を示す。

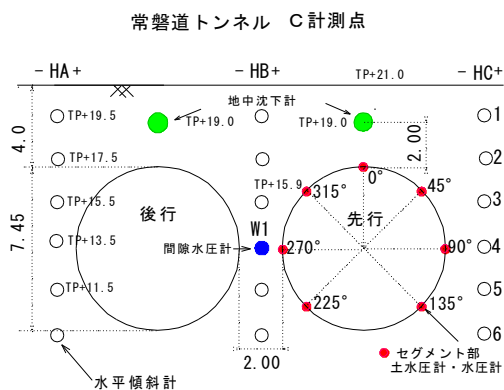


図 4-19 計測機器 配置図

間隙水圧計・水平傾斜計・土水圧計

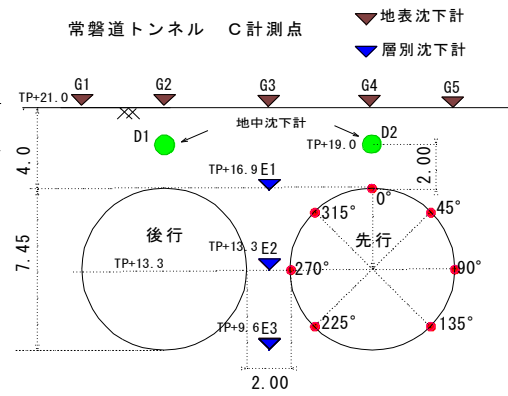


図 4-20 計測機器 配置図

沈下計・層別沈下計

(2) 先行シールド施工時

① 地表変位・シールド直上の地中変位と間隙水圧変動（先行施工時）

シールドの掘進と停止に伴い計測されたスプリングライン(SL)のシールド間に設置した間隙水圧計(W1)の経時変動について、図 4-21 に示す。

間隙水圧は、掘進時に上昇し、過剰間隙水圧の発生が確認される。また、停止時には過剰間隙水圧が消散して、低下する状況が計測される。

掘進の停止時間が長い場合には、ほぼ静水圧まで低下している。また、シールド切羽が計測

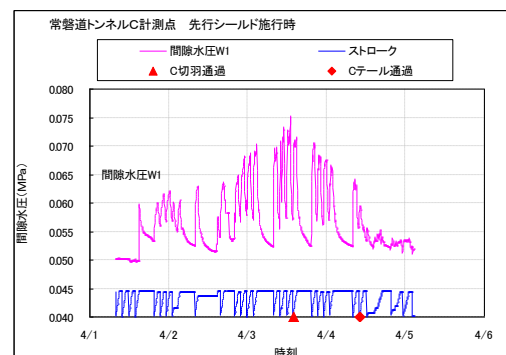
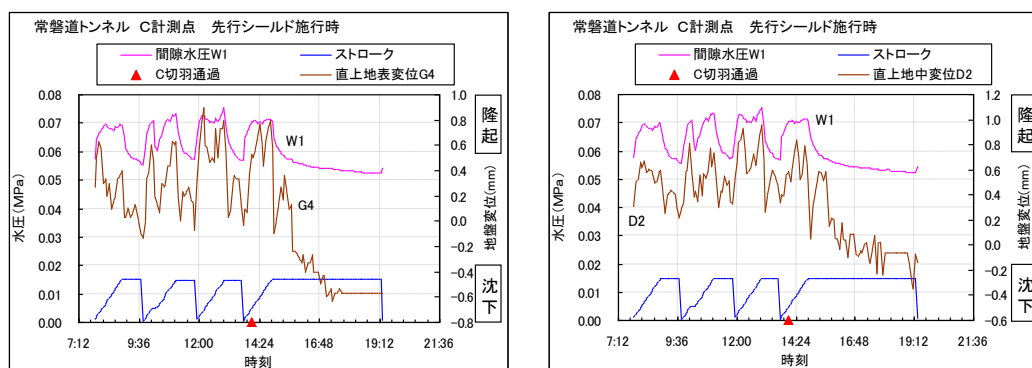


図 4-21 掘進に伴う間隙水圧変動

点に到達するより前の時点で、過剰間隙水圧のピーク値が計測されている。

なお、この先行施工は、テール通過後に間もなく到達防護工に入っており、間隙水圧の上昇はほぼ計測されなくなっている。

次に図 4-22 に、切羽通過前後の間隙水圧の変動とシールド直上の地表と地中の変位挙動を示す。過剰間隙水圧の発生と消散に連動して、地山が隆起と沈下を繰り返していることがわかる。切羽通過後にセグメント組立てと昼夜の施工パーティーの交代のために、約 4 時間の掘進停止が継続しているが、その間に過剰間隙水圧の消散がほぼ収束している。この過剰間隙水圧の消散過程と連動して地山の沈下が継続して、掘進中の隆起状態から掘進開始以前の状態まで沈下し、更にそれ以上に沈下が増加している。この計測結果から、間隙水圧の変動が地山の沈下を支配する主要な要因となっている状況がわかるとともに、周辺環境への影響抑止に関しては、停止中の沈下に着目することが必要と考えられる。



(a) 間隙水圧と地表変位

(b) 間隙水圧と地中変位

図 4-22 間隙水圧変動と地山挙動

② 鉛直方向および水平方向の地山挙動（先行施工時）

掘進と停止に伴う地表の鉛直挙動と地中における水平方向の地山挙動について、図 4-23 に示す表示方法により、切羽が計測点を通過する前後の 1 リング 1.5m の施工状況を図 4-24 に示す。なお、図に仮に表示している後行シールドは未施工である。また、地山変位の縮尺表示は、シールド等の形状寸法 1m に対して 1mm としている。

さらに、先行シールド直上には間隙水圧のラインを示すが、このラインは SL 部で計測された間隙水圧 (W1) の水頭を便宜的に水位表示したものである。

(a) は前リングの掘進停止から本リングの掘進

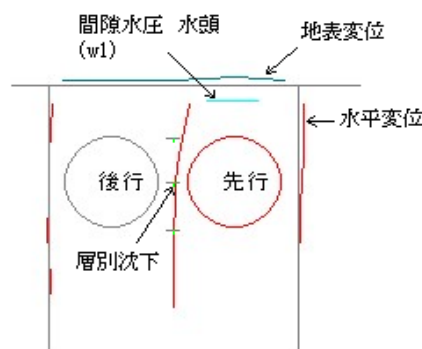


図 4-23 地山挙動表示

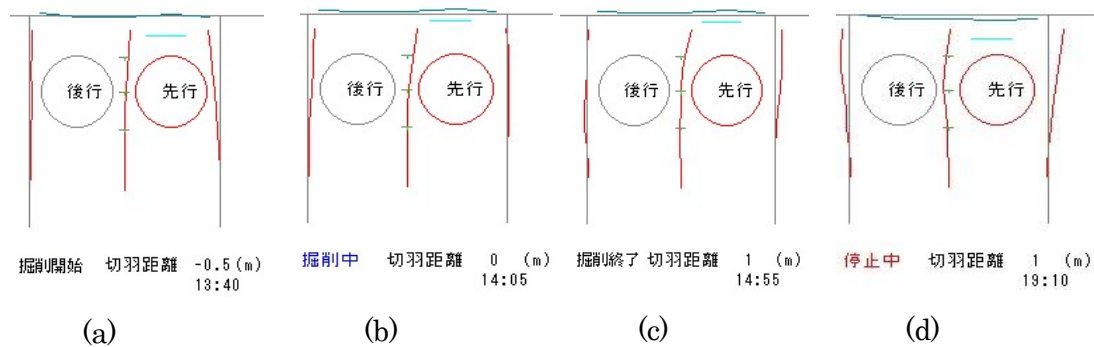


図 4-24 掘進と停止による地山挙動（先行施工時）

を開始する時点であり、(b)は切羽通過時、(c)は掘進終了時、(d)はセグメント組立て等による長時間の停止が終了した時点の状況を示す。

間隙水圧の上昇に伴い地山が隆起し、停止が継続すると間隙水圧が低下し、掘進開始時以上に沈下している状況が把握できる。また、水平傾斜計の挙動を見ると、掘進時に若干外方へ変位する傾向を示すとともに、停止中には、シールド上方の地山は更に水平横方向外方へ「拡張」しているが、これは地表付近の地山の沈下により、外方へ「押し広げられる変形」をしている状況が見られる。

③ 掘進と停止に伴う地山に対する力学的作用の変動と地山挙動（先行施工時）

掘進と停止に伴いシールドマシンから地山への作用力は変動する。作用力とその変動の詳細については、4.4.1、4.5.2 および 6.2 に、あらためて示すが、掘進時の切羽部における作用力として、ジャッキ総推力（カッター・スラスト力、周面摩擦を含む）、カッターの回転切削力を表すトルク、推力によって発生する泥土圧、添加材注入および掘進速度が考えられる。なお、「排土」に伴う作用変動は、「泥土圧の変動」に反映されているものと考えられる。

また停止中の作用として、泥土圧、添加材注入、セグメント組立ておよび姿勢補正のジャッキ操作が考えられる。

これらの作用に加えて、4.5.1 に述べる泥土圧シールド特有の「掘削に伴う切削土砂中にある有効間隙水（自由水）が泥土化の過程で地山へ排水されることによる浸透作用（泥土化余剰水の流入）」がある。

図 4-25 および図 4-26 に、基本的な作用力となるものと考えられるジャッキ総推力および泥土圧の変動とシールド直上の地表鉛直変位の挙動について、切羽通過前後の経時変化を示す。

図 4-25 においては、掘進中の推力の変動と地表変位の挙動についての相関性が概ね見られるが、その詳細については、この図においては判然とせず、また推力の作用が無くなる停止中の地山変動については、セグメント組立て時のジャッキ操作による相関性が確認される。

図 4-26 に示す泥土圧と地表変位の挙動については、掘進時には若干の相関性は見られる。また停止時の地山変動については、4.5.3 に述べる「添加材の注入による泥土圧の維持」がなされていることから、この図においては、泥土圧と変位との相関性については判然としない。

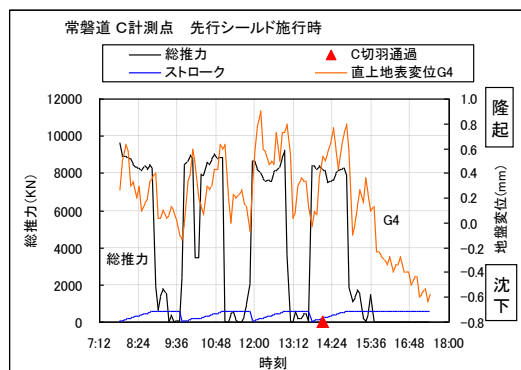


図 4-25 ジャッキ総進力と地表変位との関連

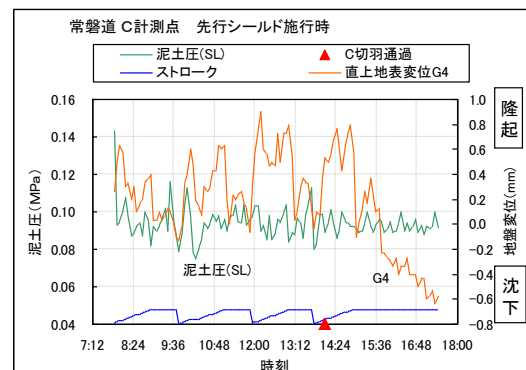


図 4-26 泥土圧と地表変位との関連

④ 地山変位の挙動と作用力との相関性(先行施工時)

掘進時および停止時の各種作用と地山挙動の相関性の程度・有無について、詳細に把握することを目的として、図 4-27(a)～(f)には、切羽到達直前の掘進開始時と掘進中の作用と変位の変動に着目した図を示す。また、(g)～(i)には、切羽が通過する 1 リングの掘進が完了した後の停止中の状況について、作用（ジャッキ操作・泥土圧・泥土化余剰水の排出）と地山挙動および間隙水圧の変動に着目した図を示す。各図による地山挙動との相関性について次に述べる。

1) 掘進中の地山挙動との相関性

図(a)：掘進開始と同時に総推力は、ほぼ定常掘進状態の値に上昇するが、地山の隆起は概ね掘進開始後、約 20 分でほぼピーク値となっており(総掘進所要時分 60 分)、総推力により直接地山を押し上げている状況は見られない。なお、総推力のピーク値レベルの変動について、図(e)に拡大して示す。これによると総推力の変動に応じて地山挙動が変動している状況がうかがえる。

図(b)：カッタートルクは、地山挙動との直接的な相関性は見られない。

図(c)：掘進開始直後から、間隙水圧の上昇傾向と強い相関性が見られる。なお、過剰間隙水圧がほぼ定常状態に達した後の地山挙動との相関性は判然としないが、図(f)による総推力と間隙水圧の変動傾向には強い相関性が見られ、総推力により間隙水圧は若干の時間遅れをもって変動している状況がわかる。

図(d)：泥土圧とは、掘進中の変動傾向に相関性が見られる。

以上のことから、掘進中の地山挙動は、時間的遅延はあるものの、総推力・泥土圧・間隙水圧の変動と相関性を有していることが確認される。

2) 停止中の地山挙動との相関性

図(g) : セグメント組立て中のジャッキ操作により地山の挙動が計測されており, ジャッキ圧力の微小な変動により, マシンの姿勢が変化したことが要因となっていることが推測される。

図(h) : 泥土圧の変動について, この場合は添加材注入により泥土圧力の低下を抑止する操作がなされており, 直接的な相関性は確認されない。

図(i) : 間隙水圧の消散に伴ってシールド直上地山の沈下が進んでいる状況が示されており, 強い相関性が確認される。

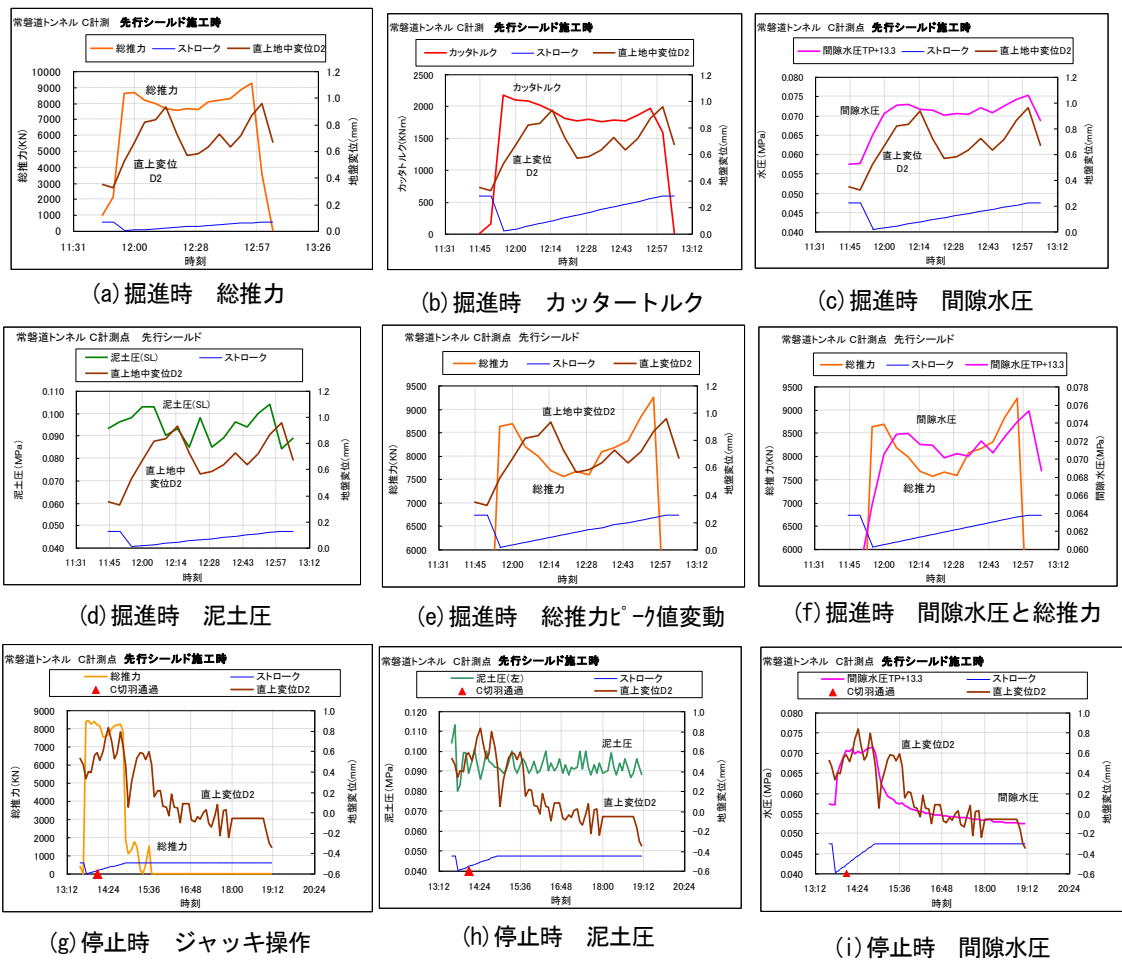


図 4-27 各種作用と変位との相関性 (掘進時と停止時)

(3) 後行シールド施工時

① 先行シールドのセグメントに作用する水圧・土水圧の長期変動 (後行施工時)

図 4-28, 図 4-29 に, 先行シールドセグメント背面に設置した水圧計および土水圧計により計測された, 後行シールドの接近時と通過時における水圧および土水圧の計測値を示す。

過剰間隙水圧は各計測位置においてほぼ同様な上昇と低下傾向を示しているが, 計測位

置により上昇量に差異があることから、圧力変動は、「全て水位の上昇によるもの」ではないことが推察される。また、長期の掘進の停止により、ほぼ静水圧まで低下していることがわかる。

土水圧すなわち、全応力の変動については、掘進による上昇と停止による低下を示しているものの、計測位置により、その変動量には差異があり、方向性を持った変動が生じていることが推察されるとともに、長期の掘進停止によっても、圧力の消散が完了していないことから、「変形の残留」が生じているものと考えられる。

なお、土水圧計測はセグメント背面に貼り付けて設置されたパット式によるものであり、裏込め注入を介しての計測値であり、地山の全応力変動を直接計測しているものではない。

ちなみに、後行シールドの掘進による影響が及ぶ前の土水圧の計測値と、「土被り圧・水平土圧係数、水圧を考慮することによる半径方向地山初期応力の概算推定値」とを比較すると、計測位置により異なるが、概ね30～50%程度の土水圧力を計測しているものと推察される。

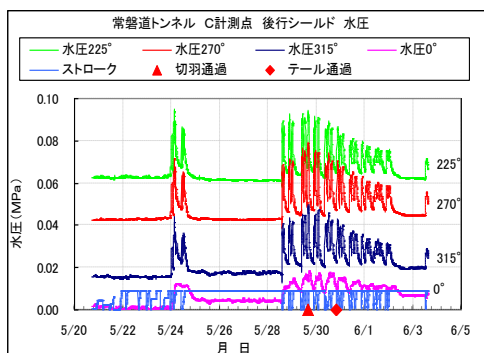


図 4-28 水圧変動

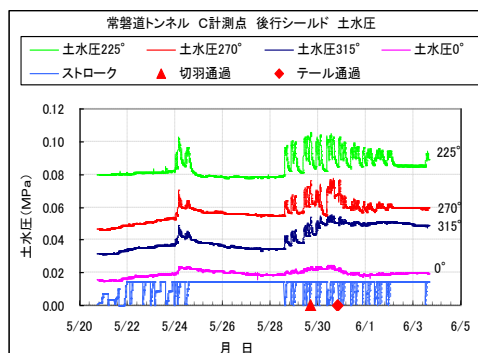


図 4-29 土水圧変動

② 水圧・土水圧の変動と地表変位（後行施工時）

切羽通過前後の状況について、図 4-30 に水圧の変動を示す。図 4-31 には、270°位置における土水圧・水圧変動とシールド直上の地山変位を示す。

先行施工時と同様に、間隙水圧の変動に応じて地山が隆起と沈下挙動を示している状況が把握できる。

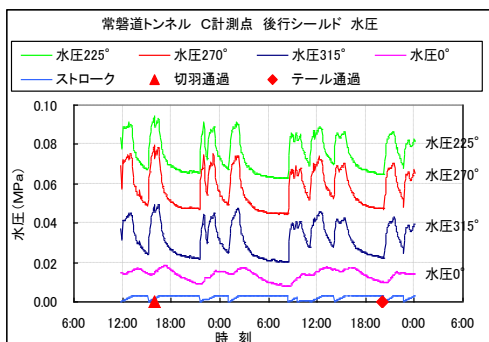


図 4-30 水圧変動

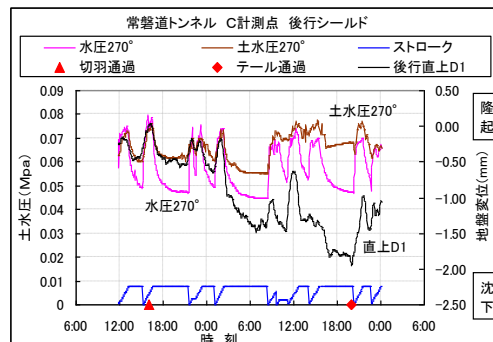


図 4-31 土水圧・水圧と地山変位の挙動

③ 鉛直方向および水平方向の地山挙動（後行施工時）

先行シールド施工時と同様に、図 4-32 に SL 部で計測した間隙水圧の変動および地表変位と水平変位の挙動について示す。なお、先行シールドは施工済みである。

地山挙動は、先行シールド施工時とかなり異なる挙動を示している。図 4-32(a) の前リング掘進後の停止が完了し、当リングの掘進を開始した状態から図(b)に至る状況によると、間隙水圧の上昇に応じてシールド直上の地山が隆起するとともに、先行シールド側の地山の隆起挙動が見られ、掘進が完了した時点の図(c)においては、その隆起の値は大きなものとなっている。さらに、図(d)には、約 5 時間の掘進停止中に後行側および先行側の地表が沈下している状況が確認できる。また、隆起と沈下の値は、先行施工時より大きなものとなっている。

また、後行側の沈下により、水平変位が「左右に拡張」しており、その傾向は先行側にも及んでいる。

これらの二次元挙動から、後行シールド施工時には、「先行シールドの存在」が「壁」となり、過剰間隙水圧の変動形態（分布）が、先行施工時とは異なった状態となっていること、および先行施工により、地山の強度低下とともに、局所的な「みずみち」が生じていることも推察される。

総括として、「泥土化余剰水」の排出と排出の停止、すなわち浸透作用とその停止に強い相関性を持って、地山が挙動している状況が確認される。

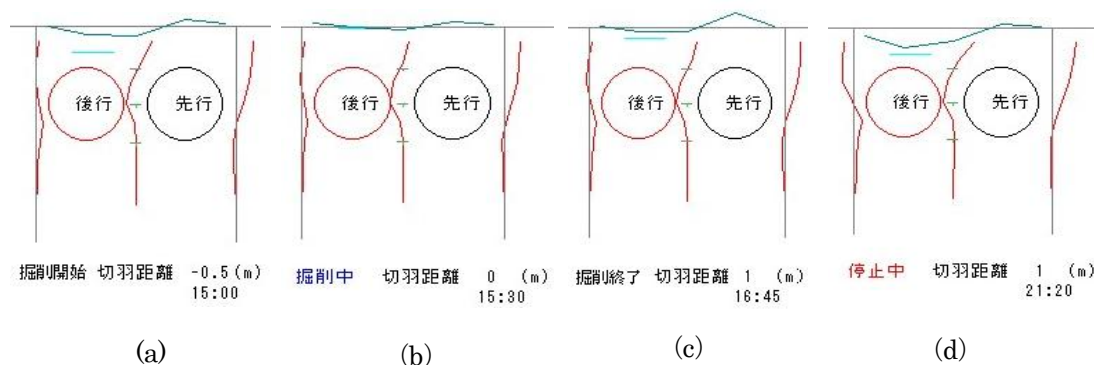


図 4-32 掘進と停止による地山挙動（後行施工時）

④ 掘進と停止に伴う地山に対する力学的作用の変動と地山挙動（後行施工時）

以下、図 4-33～図 4-34 には、切羽通過前後の数リングの総推力と泥土圧の変動と、シールド直上の地表変位の挙動について示す。また下記の⑤に示す図 4-35 には切羽通過時の掘進時と、その後マシンが通過中に長期間停止している切羽通過後 3 リング目の直上の地山挙動と掘進管理情報等を示し、各種作用との相関性について考察する。

なお、切羽通過時の一リング掘削所要時分は約 80 分である。

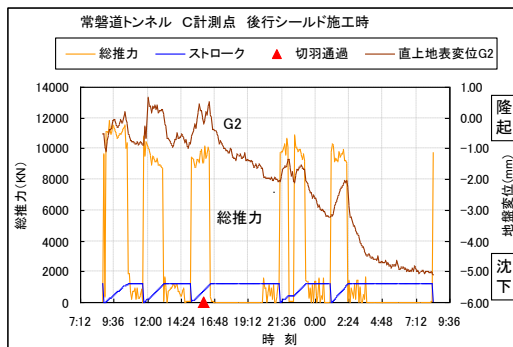


図 4-33 総推力と地表変位

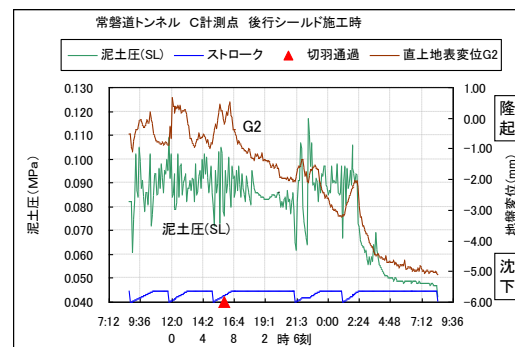


図 4-34 泥土圧と地表変位

これらの各図によると、総体的な挙動は先行施工時とほぼ同様である。

まず、掘進開始時には、総推力と直上変位の相関性は見られないものの、掘進途中においては、総推力の変動と地山挙動の変動に相関性が見られるとともに、過剰間隙水圧の変動と地山鉛直変位には強い相関が確認される。また、停止時の沈下傾向は、過剰間隙水圧の消散と連動しており、あわせて停止時の泥土圧保持のための添加材注入はなされていないことから、泥土圧も連動して低下している状況が明らかになっている。

なお、掘進中の過剰間隙水圧の上昇傾向について、定常状態に達するのに総掘進時分約 80 分に対して約 50 分を要しているが、前述のとおり、先行施工時には総掘進時分約 60 分に対して概ね 20 分程度となっており、先行施工時とは掘進条件と地山性状に差異があることが推察される。

⑤ 地山変位の挙動と作用力との相関性(後行施工時)

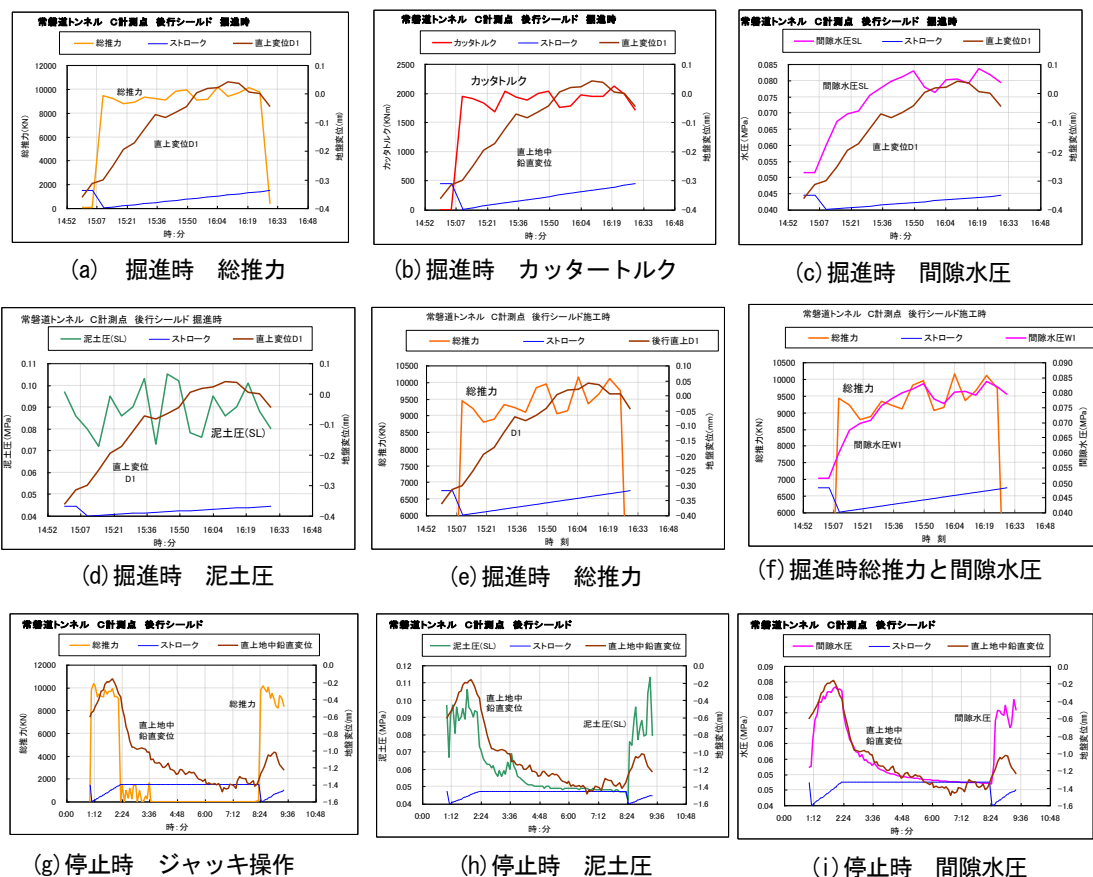


図 4-35 各種作用と変位との相関性(掘進時と停止時)

(4) 先行と後行施工時の間隙水圧変動とシールド直上の地表変位の比較

前述の通り, 先行シールド施工時と後行シールド施工時における地山挙動の形態には差異が生じており, 後行施工時には, 先行施工による地山強度変化と先行トンネルの存在による「作用力と排出余剰水による浸透流の伝播形態」が異なっていることがひとつの要因であると推察される。

このような状況について, 掘進管理項目から把握できる施工上の差異の有無・程度を比較して, 間隙水圧変動に影響する要因について考察する。

図 4-36～図 4-39 に各種施工情報について, 先行と後行施工時を比較して示す。

図 4-36 によると, 間隙水圧の上昇量に大きな差異(約 0.015MPa)が生じており, これに伴い掘進中の隆起量と掘進停止中の沈下量にその影響が及んでいることが明確に確認できる。

図 4-37 において, 地山挙動に直接的な影響を及ぼす総推力と泥土圧を見ると, 泥土圧には大きな差異は見られないが, 総推力は, 後行施工時が高くなっており, 顕著な差異(約 1500kN)が現れている。

総推力が高くなる要因として、掘進速度やカッタートルクの増加との関連が推察されるが、図4-38においては、むしろ先行施工時の方が掘進速度が速く、カッタートルクもやや大きいことから、本比較における総推力の上昇にはこれらの施工要因が影響している状況は確認されない。

また、図4-39では、添加材注入について時間当たりの注入量と圧力の変動を比較すると、先行施工時の方が多く注入されている。図4-38に示されるように、先行施工時は後行施工時より掘進速度が10%程度速い（先行23mm/min，後行20mm/min）ことから、取込土砂量に応じて自動制御機能が作動しており、時間当たりの注入量が変動（先行280L/min，後行240L/min）しているものと思われ、添加材注入の影響は見られない。

以上のことから、先行と後行施工における間隙水圧の上昇形態の差異は、掘進要因による影響よりは、先行施工による「先行シールドの壁の存在」と「地山強度・透水性状の変化」により、地山条件が変化したことに伴い、作用力と浸透作用による地山挙動とその伝播に差異が生じたことによるものと考えることが妥当と推察される。

① 間隙水圧変動と地表変位の比較

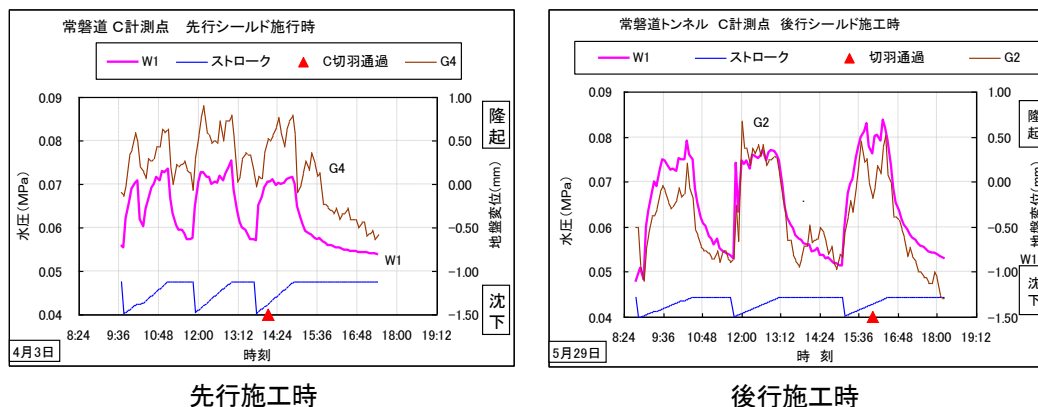


図4-36 間隙水圧とシールド直上の地表変位

② 総推力と泥土圧の比較

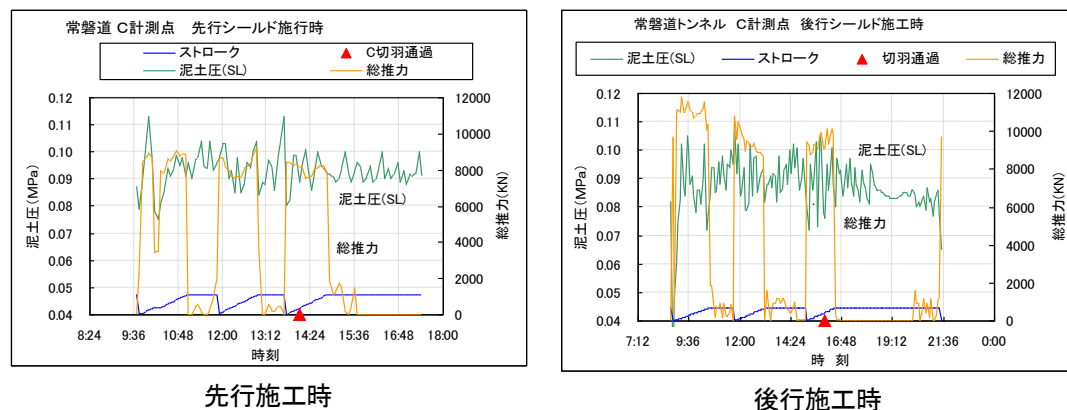


図4-37 総推力と泥土圧

③ 掘進速度の比較

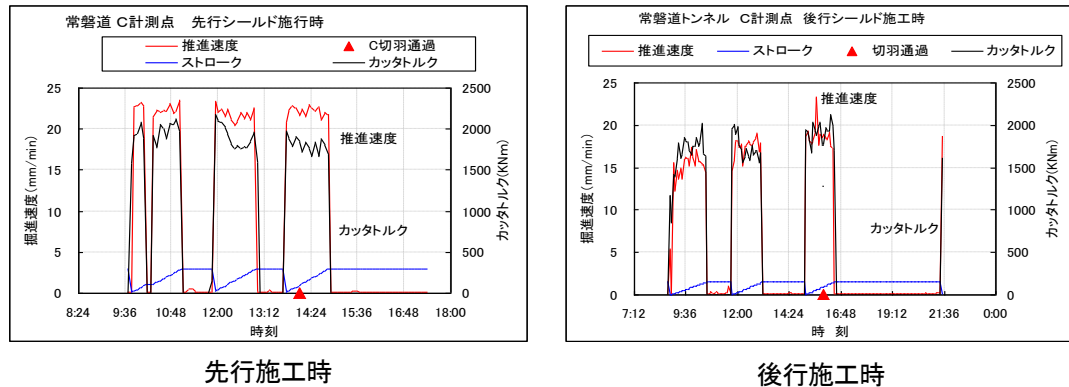


図 4-38 掘進速度とカッタートルク

④ 添加材注入圧・量の比較

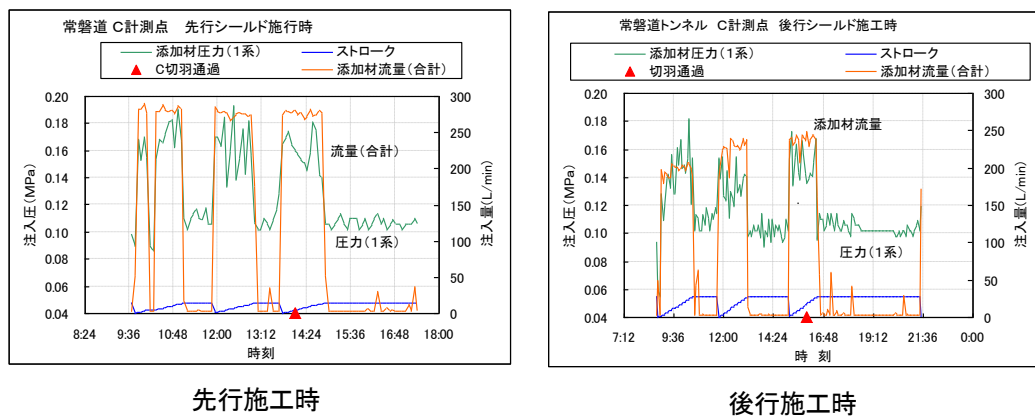


図 4-39 添加材注入圧・量

(5) 周面摩擦の影響

周面摩擦は直接計測することは困難であるものの、4.4.2において、ビット圧の推測の項で具体的に述べるように、総推進力の約20%程度が周面摩擦力であると考えられる。

掘進に伴い、周面摩擦が直接地山挙動に影響する場合には、「地山を引きずる」作用として現れてくるものと推察される。

この作用はマシン全周において周辺地山に影響を及ぼすものであることを勘案すると、マシン上方のみならず、水平方向にも作用影響が現れることになる。

そのような状況の有無について、先行施工時の図4-24および後行施工時の図4-32により地山挙動を比較分析する。

両図で、掘進中においてマシンが計測点を通過した後の地山の水平方向挙動、すなわち(b)→(c)におけるSLでの挙動には、(a)→(b)における変形以上の有意な変形は、ほぼ認められない。

このことから、周面摩擦により、掘進中の隆起すなわち、シールド直上の地山を上方向に押し上げが生じているものとする、水平横方向においては外方へ押しやる作用をするものと考えられるが、そのような地山の挙動は確認されない。

したがって、掘進中の隆起は周面摩擦による可能性は低いものと推察される。

しかしながら、停止時にシールド直上の地山が沈下するのに連動して、その下方地山が水平方向左右に「拡張（押し広げ）」される挙動を示すことを勘案すると、掘進時に隆起する場合には、水平方向左右は「縮小」していることも推察される。その影響により、「周面摩擦による水平方向の拡張」は「シールド直上地山の鉛直隆起に応じた水平方向の縮小」と相殺されている可能性も無視することはできないものと考えられる。

なお、周面摩擦が作用している場合には、多くの時間差を生じることなく「鉛直方向に隆起」すると考えられるが、そのような隆起挙動が発現していないことから、周面摩擦の影響が存在するとしても、シールド直上の鉛直変位の全てが、周面摩擦力により上方向に変位する作用を受けたことによるものではないものと推察される。

(6) 浸透力による地山の隆起について

当該地山は、「中程度にゆるい砂質層」であり、地震動を受けた場合には、液状化が生じやすい地山である。

シールドの掘進(20～30mm/min)とカッターディスクの回転(約 0.7rpm)切削による「繰り返し作用力」や「泥土化余剰水の排出」による過剰間隙水圧の発生に伴い、天端上方地山において、「重力による上載有効応力」が「減少またはほぼゼロに近い、液状化に類する状態になること」に伴う「隆起挙動」の可能性について検討する。

表 4-2 地山物性値

	N値	相対密度	D50 mm	飽和度 %	内部 摩擦角 %	透水係数 cm/sec	間隙比	土粒子 密度
凝灰質粘土	2～5	—	0.007	92	30	10 ⁻⁵	3.4	2.72
砂	6～25	0.5	0.194	93	35	10 ⁻³	0.89	2.65

過剰間隙水圧の発生に伴う浸透流の動水勾配を算定して限界動水勾配との対比を行い、浸透流による「破壊隆起」の可能性についての目安を得る。図 4-40 には、先行および後行施工時に、マシン切羽の計測点に対する距離に応じた計測点での間隙水圧の変動について示す。

この図により、掘進軸方向の過剰間隙水圧の変動すなわち浸透流の浸潤面がおおむね把握されているものと考えられる。浸潤面は、非線形であるものと考えられるが、動水勾配は概ね 0.08 程度と推測される。

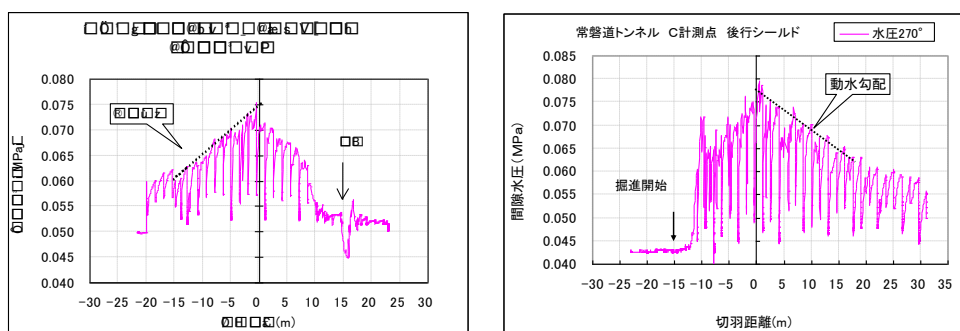


図 4-40 間隙水圧変動と切羽距離

一方、表 4-2 に示す砂層の地山物性から限界動水勾配を推測すると、

$$\text{限界動水勾配} = (G_s - 1) / (1 + e) = (2.65 - 1) / (1 + 0.89) = 0.87$$

となる。

これによると、動水勾配 ≪ 限界動水勾配であり、浸透力によるシールド直上の砂質層の破壊(クイックサンド、ボイリング)が生じる状態には達していないことから、浸透力による地山破壊を起因とする隆起挙動ではないものと推察される。

しかしながら、地震に伴う「液状化の発生」は、初期平均有効応力状態からの変化割合すなわち「相対平均有効応力変化率¹⁶⁾」に左右されることや、過剰間隙水圧が有効上載圧より低い場合においても、液状化が生じる可能性があることが示されており¹⁶⁾、上記の簡易な試算により判断することは拙速でもある。

したがって、シールド掘進における「浸透力による隆起」の可能性についての解明は、今後研究を必要とする課題であると考えられる。

4.3.2 地山挙動の基本^{15), 16), 17)}

(1) 作用力と地山変形についての基本認識

① 土の変形と有効応力の原理

シールドの掘進と停止に伴う地山の挙動を分析するに際して、「作用力を受ける場合の土の挙動」について、基本事項を整理する。

土質力学では、土の強度や剛性等の材料特性は有効拘束圧（平均有効応力 σ'_m ）に支配されることから有効応力の概念は非常に重要であり、これを「有効応力の原理」とされている。

土は単一の物質ではなく、土粒子とその間を埋める間隙物質との混合体であり、間隙水で飽和している土の要素に作用する応力（全応力）は、土の土粒子に作用する応力（有効応力）と水に作用する応力（間隙水圧）に分けることができる。

土粒子に作用する応力は、土粒子の形状そのものを変化させるとともに、土粒子の構造骨格も変化させることになる。しかし、通常は土粒子の形状の変化は、土粒子の構造骨格の変化に比べてほとんど無視できるとされている。すなわち有効応力とは、土粒子の構造骨格を変化させる応力である。

土に外力を作用させると変形が生じ、そのひずみが小さい場合には、外力を除去すると、変形は外力を加える前の状態に戻るが、一般的には弾塑性変形が生じ、元には戻らない変形が発生する。

土（骨格）の変形挙動は、平均有効応力の変化に伴う体積変化、せん断力による変形、ダイレイタンスーに分けると理解しやすく、さらに間隙水がある場合には、その間隙水の挙動、すなわち水が土の中を流れるのか（排水）、流れないのか（非排水）という地山の性状と条件を考慮する必要があるとされている。

② ダイレイタンスー

ダイレイタンスーとは、レイノルズにより発見された土のような粒状体独特の性質のことで、せん断変形に伴って体積変化が発生する現象である。すなわち、ダイレイタンスーの量は、せん断ひずみの増分に依存するとともに、有効拘束圧（平均有効応力）の増分にも依存するとされている。

体積収縮が起こる場合を負のダイレイタンスー、体積膨張が起こる場合を正のダイレイタンスーと呼ばれる。繰り返しせん断力を受けると、ゆるく堆積した地山では砂粒子の大きな間隙に落ち込みが発生して体積が減少し、密な地山では土粒子間の乗り上がりが生じて体積が増加する傾向を示す。

水で飽和された地山においては、間隙水の移動が充分でない非排水条件の場合には、せん断力の作用により体積収縮を起こそうとするが、水の圧縮性が土骨格の圧縮性より小さいため、土の間隙に含まれている水が間隙の外に出て行かない限り、実質的な体積収縮は

生じない。砂のように粘土に比べて透水係数が比較的大きな場合においても、水が流れるのに一定の時間を要することから、比較的短時間にせん断力が作用する場合には、砂は非排水状態となり、ダイレイタンシーによる体積収縮を起こすことができず、過剰間隙水圧が発生し有効応力が減少するため、剛性や強度が低下することになる。一方、排水条件下では体積の減少により砂が密になるために、剛性や強度が増加することになる。

③ 体積変化

シールドの掘進と停止による作用力に伴う地盤変形について考察すると、図 4-41 に示すように、掘進方向である水平軸方向に対しては、マシン作用力により押されるので圧縮されることになり、水平横方向及び鉛直方向は基本的には拘束されていないことから、ポアソン効果により「拡張」傾向になるものと推察される。

さらに、軸方向の圧縮力だけでなく、「掘進」によるせん断力も作用していることが推測されることから、実際の地山の挙動は、圧縮力の作用による変形とせん断力の作用による変形、それに加えてダイレイタンシーによる体積変化と間隙水圧の変動を伴った挙動を示しているものと考えられる。

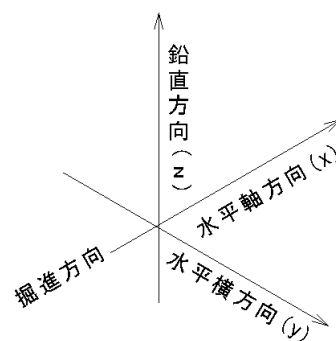


図 4-41 座標軸

(2) 掘進作用力と浸透作用を伴う地山の変形挙動

シールド掘進によるマシンから地山への作用力と泥土化過程で発生する余剰水の地山への強制排水が同時に作用する場合の地山の全応力の変化、すなわち有効応力と間隙水圧の変化と地山挙動について考察する。

さらに掘進の停止による作用力と余剰水の排水の停止に伴い、新たな応力状態に変化する場合の応力状態と地山挙動について、4.3.1 で示した地山挙動計測結果を踏まえるとともに、土・水の連成現象の概念¹⁸⁾,¹⁹⁾を参考として考察する。

シールド掘進時には、地山を押し付ける作用力の載荷と併行して、地山に「泥土化加圧余剰水」が押し込まれる。

この場合の地山の体積ひずみは、マシンからの作用力による水平軸方向の圧縮ひずみと、流入水により地山が拡張されて膨張することによるひずみが重なったものとする。

図 4-42 の各図においては、切羽近傍と遠方の地山の初期状態を点線で示し、作用力等による体積ひずみ変化を実線で示す。なお、切羽部での作用力および流入水の圧力の切羽遠方への伝播は、漸減するものと想定する。

作用力による地山の体積ひずみの概念図を(a)に、水の流入による地山の体積ひずみの概念図については(b)に、それらを合算した状態を(c)に示す。

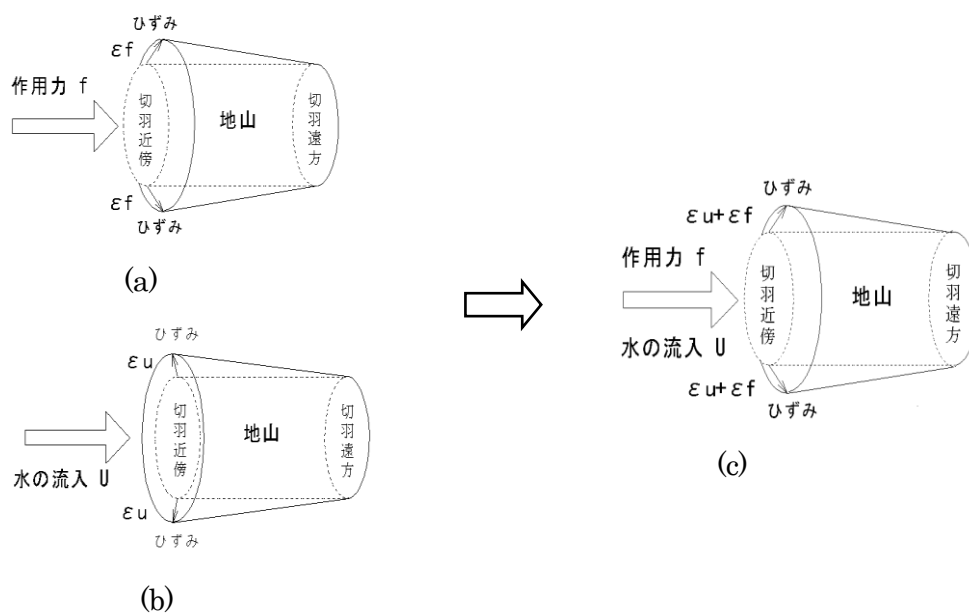


図 4-42 作用力と余剰水流入による地山ひずみの概念図

(a)に示す地山のひずみには、掘進作用力によるひずみとせん断変形によるひずみに加えて、それらに伴うダイレタンスーによるひずみが含まれているものとする。

また、ここに示す体積ひずみの「膨張または縮小」は概念であり、地山性状や作用力と排水圧力の程度により、ひずみの形態は異なるものと考えられる。

これらの体積ひずみの変化は次のようにも表すことができる。

地山のひずみ変化＝作用力による応力変化／剛性＋余剰水の流入によるひずみ

次に、掘進の停止に伴い、作用力と余剰水の流入がともに停止することになり、あわせて上昇した過剰間隙水圧が地山中に浸透して消散する。これにより、掘進時とは逆に、通常は縮小する体積ひずみ変化が発生して、シールドの鉛直上方では地山の沈下を生じることになる (図 4-43)。

なお、水平軸方向および水平横方向のひずみ変化量 (初期状態からの変動) は、4.3.1 において、水平傾斜計による変位の変動について示したとおり、掘進停止時には上方地山の沈下により水平横方向に「拡大」していることから、水平軸方向の地山挙動は必ずしも図 4-43 に示すように「縮小」変動を示すとは限らないものと推察される。

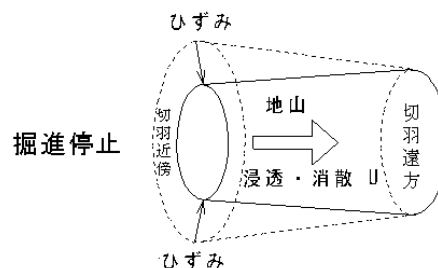


図 4-43 掘進の停止による地山の体積変化

以上の検討とともに、計測された地山の変形と過剰間隙水圧の変動を踏まえて、シールド掘進に伴う地山挙動を下記に整理する。なお、先行施工による後行施工時の影響については、前述したところである。

- ・ 地山は、掘進開始に伴う総推力の作用開始から若干の時間遅れをもって隆起変形を生じ始める。
- ・ 掘進に伴う泥土化余剰水の浸透作用による過剰間隙水圧の上昇変動と地山の隆起変形の経時変化は、掘進開始から停止に至るまでの間において、強い相関性を有している。
- ・ 地山変形の計測値の経時変化との相関性から判断すると、本施工においては、作用力による影響よりは、浸透作用による影響が大きくなっているものと推察される。
- ・ 掘進中の過剰間隙水圧の増加量と総推力等の作用力の大きさとの相関性は明確ではないものの、過剰間隙水圧が確実に発生していること、および直上地山に許容範囲内での隆起が生じていることが、円滑な施工のひとつの証左であると考えられる。
- ・ 停止中には、作用力の停止と泥土化余剰水の浸透作用の停止にともない、直上地山の沈下が確実に生じている。その沈下量は、掘進中の隆起が基に戻る以上に沈下しており、掘進停止中の挙動の把握が重要であると考えられる。
- ・ 掘進時の泥土圧と地山の変形の相関性の程度には、先行と後行において強弱が見られる。泥土圧はジャッキ推力により確保されるものであるが、その値の変動は、ジャッキ推力の変動だけでなく、排土量や添加材注入圧の影響も受けているものと推察される。

(3) 課題

地山の挙動と応力状態の変化の検討の過程において考察した、泥土化余剰水の加圧排出を原因として、地山に発生する浸透流による作用に伴い生じる地山のひずみについては、地山の特性により、その挙動は変化するものと推察される。

また、間隙水圧の変動と地山の挙動との関係および先行シールド施工による周辺地山の特性の変化、さらには先行シールドの存在下での後行シールド施工による間隙水圧の変動や地山挙動について明らかにすることは、シールド施工に伴う地山変位の抑止を目指す掘進管理に対して重要な指標が得られる可能性があるものと考えられる。

そのためには、掘進時にはマシン推力と余剰水排水の強制排出が作用し、掘進停止時にそれらの作用が停止することが繰り返される場合の地山の挙動について、浸透と土粒子骨格の変形を考慮した有限要素法などによる「連成解析」により追跡することは、重要な課題と考えられ、今後の研究が望まれるところである。

以上の検討とともに、計測された地山の变形と過剰間隙水圧の変動を踏まえて、シールド掘進に伴う地山挙動を下記に整理する。なお、先行施工による後行施工時の影響については、前述したところである。

- ・ 地山は、掘進開始に伴う総推力の作用開始から若干の時間遅れをもって隆起変形を生じ始める。
- ・ 掘進に伴う泥土化余剰水の浸透作用による過剰間隙水圧の上昇変動と地山の隆起変形の経時変化は、掘進開始から停止に至るまでの間において、強い相関性を有している。
- ・ 地山変形の計測値の経時変化との相関性から判断すると、本施工においては、作用力による影響よりは、浸透作用による影響が大きくなっているものと推察される。
- ・ 掘進中の過剰間隙水圧の増加量と総推力等の作用力の程度との相関性は明確ではないものの、過剰間隙水圧が確実に発生していること、および直上地山に許容範囲内での隆起が生じていることが、円滑な施工のひとつの証左であると考えられる。
- ・ 停止中には、作用力の停止と泥土化余剰水の浸透作用の停止にともない、直上地山の沈下が確実に生じている。その沈下量は、掘進中の隆起が基に戻る以上に沈下しており、掘進停止中の挙動の把握が重要であると考えられる。
- ・ 掘進時の泥土圧と地山の变形の相関性の程度には、先行と後行において強弱が見られる。泥土圧はジャッキ推力により確保されるものであるが、その値の変動は、ジャッキ推力の変動だけでなく、排土量や添加材注入圧の影響も受けているものと推察される。

(3) 課題

地山の挙動と応力状態の変化の検討の過程において考察した、泥土化余剰水の加圧排出を原因として、地山に発生する浸透流による作用に伴い生じる地山のひずみについては、地山の特性により、その挙動は変化するものと推察される。

また、間隙水圧の変動と地山の挙動との関係および先行シールド施工による周辺地山の特性の変化、さらには先行シールドの存在下での後行シールド施工による間隙水圧の変動や地山挙動について明らかにすることは、シールド施工に伴う地山変位の抑止を目指す掘進管理に対して重要な指標が得られる可能性があるものと考えられる。

そのためには、掘進時にはマシン推力と余剰水排水の強制排出が作用し、掘進停止時にそれらの作用が停止することが繰り返される場合の地山の挙動について、浸透と土粒子骨格の变形を考慮した有限要素法などによる「連成解析」により追跡することは、重要な課題と考えられ、今後の研究が望まれるところである。

4.4 泥土

掘削した土を利用して、そのまま攪拌・混合するか、添加材を加えチャンバー内で攪拌・混合して改良し、切羽を押さえる作用と同時に切削土砂を取り込みながら排土作用を円滑に行なうことができる状態の土砂が泥土圧シールドにおける泥土である。また、掘削土砂をこのような泥土圧シールドにおける機能を発揮する性質の土砂に変えることを泥土化という。ここでは、泥土圧シールド施工時の地山挙動を考えるにあたって、基本的な理解のため、泥土と泥土化について考察する。

泥土圧はチャンバー内に充満した泥土が持つ圧力であり、その圧力を発生させる源となる力は、シールドの推進力である。しかしながら、泥土は、軟弱粘土を攪拌・混合したものや地山材料に添加材を注入して攪拌・混合して作ったものであり、土粒子としての粘土、シルト、砂・礫と水、さらには、加えられた添加材から構成されており、その性質は、これらの混合状態に加え、加えられる添加材の性質によって異なるものと考えられる。したがって、泥土圧の作用のメカニズムを考えるにあたっては、このような泥土の性質の相異と作用メカニズムとの関係を明らかにすることが必要と考えられる。

ここでは、泥土圧シールドにおける泥土の性質について、添加材料と泥土化の観点から述べる。

4.4.1 添加材

添加剤として用いられる材料については、表4-3のような製品が用いられている²⁰⁾。高分子系の増粘剤、吸水性高分子、ベントナイト、セルロースと高分子の混合物、無機珪酸塩と特殊ポリマーなど様々な材料からなっている。

表 4-3 主な添加剤とその特性

添加剤名	材料の種類	添加剤の粘性(1h後) cp	特 徴	分離・脱水の有無
クリーンSP-AE	アクリル系樹脂 水溶性	800～11500	クニゲルV1との併用	
クリーンSP-H	アクリル系樹脂 水溶性	2000程度	単体あるいはベントナイトを併用 ゲル特性なし	
WAP-S	高吸水性樹脂		球状、土粒子の摩擦減、高ゲル強度 吸水能を残したままの注入で難透水性	
KT-GEL	セルロース系水溶性高分子(増粘剤)	500～7000		添加材そのものの 脱水性は確認されて いない
PMFスーパー加泥材	製紙スラッジ(PMF)とフライアッシュ		低粘性で地山に浸透もPMFの目詰め効果	
スーパーゲル SPバインダー	CMCの改良型、無機珪酸塩・特殊ポリマー 無機珪酸塩・特殊ポリマー	50～10000	スーパーゲルの改良型(球形吸水ポリマーとバルブ繊維状物を含有)	脱水はない
アルファG	無機珪酸塩・特殊ポリマー	配合で6000以上可能	高分子:イオンに弱く、バクテリアに食われる WAPやスーパーマッド(エマルジョン型液体高分子と併用も) KT-GELの発展型	
スーパーコート	アクリルアミド/アクリル酸共重合	3000以下	粘土、ベントナイト、スーパーゲル等との併用可	
ハイフロッカー-S-180	有機系合成高分子	1000～2000	団粒子として粘土分と水を取り込む。団粒子は変形性卓越 (ロックマスターの改良型)	
コロイダルシリカ	SiO ₂ 無機物	ゼリー状Nゾル 13000	半寒天状で注入 Nゾルはせん断力で粘る。98%は水分。 ゾル化は15～30分	
CP-M	植物性天然高分子(ケミカルプラグ)		粘土、ベントナイトに混ぜて使用(泥しょうとして)	
ハードロンL	水溶性高分子(増粘材)			
特殊起泡剤OK-1	界面活性剤			
特殊起泡剤OK-2	セルロース系水溶性高分子			高压で脱水
ベントナイト	粘土鉱物(ベントナイト)			高压で脱水

泥土の性質と泥土化を考えるにあたって重要なことは、①土圧式シールドの開発経緯から、軟弱粘土を攪拌・混合した材料が土圧式シールド工法に必要な泥土としての性質を充分備えていること、②添加材を加えて攪拌・混合することで様々な粒度分布の地山材料が泥土圧シールド工法に必要な泥土としての性質に変わるということであり、前者は、粘土と水、後者は、粘土から礫までの土粒子と添加材と水から成っている。したがって、軟弱粘土を攪拌・混合して作る泥土の性質は、練り返し粘土の性質を考えること、一方、添加材を加えて作る泥土の性質は、添加材の性質とその混合状態が泥土の性質を決める鍵となり、その混合状態での泥土の性質が添加材のいかなる性質によって影響されるかを解明することにより明らかになるものと考ええる。

斎藤ら²⁰⁾によれば、添加材を用いて作った泥土の構造は、図 4-44 に示す飽和土の水の代わりに添加材が土砂の空隙を満たした状態で土粒子同士が接触状態にあると考えられている。水は非圧縮性材料であるがこれに代わる添加材の性質については明らかになっておらず、その性質によって、泥土の性質が異なってくることは容易に想像できる。飽和砂質土の性質との相違に注目して泥土の性質を考えた場合、水の性質と比べるべき重要な性質と考えられるのは、添加剤の圧縮性、粘性と加圧による脱水性である。

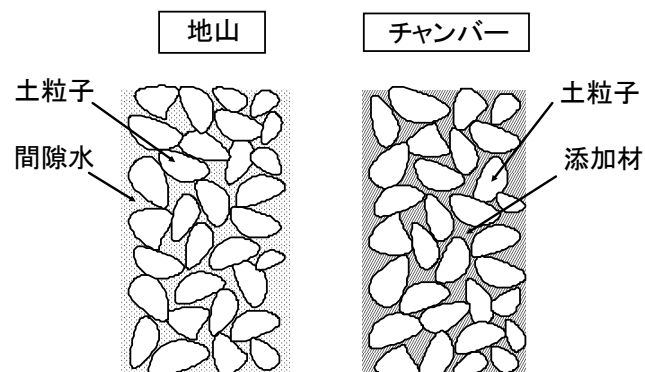


図 4-44 地山とチャンバー内泥土の模式図

粘性については、土粒子の流動性を確保する重要な条件として様々な配合で調整されており、地盤の間隙水圧、土砂の粒度組成に合わせて様々な粘性の添加材が作られている。また、掘削土との攪拌・混合の過程で地山水と混合され希釈されて、注入時の添加材の粘性とは異なった粘性状態で泥土を形成することにもなる。添加剤としてセルロースや PMF[®]を主体とする場合やベントナイトが主体の添加材の場合には、添加剤の吸水機構からみて脱水性がある可能性は推測されるが、添加材そのものの脱水性については表 4-4 に示すように概ね脱水性はないと考えられる。また、ゾル状で注入されるコロイダルシリカを添加剤として用いた場合であり、吸水性樹脂を用いた場合には、吸水した樹脂と水の混合水が注入されるものの、それ以外の添加材は粘性流体として注入される。

表 4-4 添加材の脱水性（瀬古 T）¹⁰⁾

試料 番号	粘 度 (cps)	スランプ (cm)	ブリージング率(%)						加圧脱水量 (cc)	備 考 (目視等)
			1H	2H	3H	5H	12H	24H		
0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
1	1300	0	0	0	0	0	0	0	26	
2	1300	9	0	0	0	0	0	0	27	
	1300	15	0	0	0	0	0	0	14	
	1300	17	0	0	0	0	0	0	12	
5	2600	1	0	0	0	0	0	0	24	
6	2600	7	0	0	0	0	0	0	22	
	2600	15	0	0	0	0	0	0	10	
	2600	18	0	0	0	0	0	0	9	
9	3200	0	0	0	0	0	0	0	24	
10	3200	4	0	0	0	0	0	0	19	
	3200	14	0	0	0	0	0	0	10	
	3200	19	0	0	0	0	0	0	9	
13	1500	5	0	0	0	0	0	0	19	
	1500	19	0	0	0	0	1.0	2.8	16	
15	1400	4	0	0	0	0	0	0	21	
16	1400	4	0	0	0	0	0	1.0	18	
17	1000	0	0	0	0	0	0	0	16	
18	1000	12	0	0	0	0	0	0	10	
	1000	15	0	0	0	0	0	0	10	

本文では、使用頻度が少なく他の添加剤とは特性の異なる気泡剤を除き、使用頻度の高い添加剤を用いた添加材を念頭に考察する。

＊) PMF (Polymer Material Fiber)

4.4.2 泥土の性質

泥土圧シールドを円滑に施工するために、泥土には次の3つの作用が期待される。

- 1-① 切羽を有効に支保する
- 1-② 切削土砂を容易に取り込める
- 1-③ スムーズに排土できる

これらの適切な機能を有するための泥土の性質は、いわゆる、泥土のコンシステンシーと呼ばれるものである。このような抽象的な性質を有効な物理指標で特定化しようとする試みとしては、押し込みせん断力に対する抵抗値などによる判定手法の研究¹⁷⁾などが行なわれているが、土砂性状改良のため用いられる添加材の性質も原材料である添加剤により異なっているため、地山そのものの特性に応じてスランプ値が指標として用いられている程度で、もっぱら、目視や手触りなどにより泥土の良否を判断している状態であり、汎用性があり、確実な判定が得られる手段の研究開発が必要と言える。泥土が図 4-44 に示すような地山の間隙水と添加材が置き換わった構造からなるものと考ええると、泥土の性質は添

加材の性質と密接な関係があると推定されることから、別途、第5章で泥土の機能およびその性質と添加材の特性との関係について考察する。

なお、いわゆる軟弱粘土層を掘削する場合においては、このような添加材を用いる必要はなく、攪拌・混合するだけで、あるいは、加水して攪拌・混合するだけで良好な泥土の機能を果たすことから、泥土の特性やそれに起因する現象のメカニズムを考察するに際しては、攪拌・混合された軟弱粘土においても添加材を注入して攪拌・混合して作った泥土と同様の現象が成立するメカニズムが示せることが必要となると考えられる。

4.4.3 泥土化

(1) 軟弱粘性土と一般の粘土の場合

軟弱粘性土は、もともと材料そのものが透水性の低い材料であり、泥土が備えるべき低い透水性や不透水性を有する材料である。この材料は一般に鋭敏比が高いという特性を持つことから、攪拌・混合により練り返し粘土状となって高流動性を持つようになる。したがって、飽和状態の軟弱粘性土を攪拌・混合して作った泥土は、単位体積重量は地山と同程度で、含水量もあまり変わらない。このような材料が、4.4.2 で述べた良好な泥土の特性を備えていることは容易に想像できる。

一方、一般の粘土の場合は、加水して攪拌・混合を行うことによって土圧式シールドにおいて泥土として用いられる。一般の粘土と軟弱粘土の相違は、その含水状態や圧密や固結の程度の相違であり、構成成分は違わない。したがって、加水して水分を補い、攪拌・混合することにより、液性限界に近い含水比にすることで高い鋭敏比をもつようになり、結果的に軟弱粘土を攪拌・混合したのと同様の状態が形成され、泥土としての機能を果たすことになると考えられる。このような場合は、加えられた水のうち泥土化に使われなかった余剰水は地山に排出されにくいことから、適切な泥土状態を確保して排土率が100%に近い施工を行う必要がある。

(2) 添加材を加えて行う泥土化（砂・砂礫層の場合）

a) 添加材の作用と役割

添加材の注入は、掘進中には、フィッシュテール部やカッタービット部を中心に行われる。添加材は、掘削対象となる地盤の特性に応じて所要の性質の泥土が作られるように適度な配合で注入される。また、添加材は、4.4.1 で述べたように、水と混合された粘性の高い水溶液や混合液、または、ゾル等の粘性流体であり、ベントナイトや高分子系材料は、吸水膨張した状態で注入されるので、一般に比較的粘性が高く、地山の隙間には簡単に浸入していかない。

一方、添加材注入には加圧作用・土の組成を変える2つ作用がある。加圧作用は、圧力を持った流体塊の泥土への浸入形態によって異なる。高圧大量でないと泥土の中まで浸入

していきにくい。土の組成は一定量の添加材を加え流体塊が攪拌混合によって土粒子間に平均的に混じることによって変わり、均質な組成の泥土ができる。

図 4-45 に示すように、フィッシュテールによるカッタースポークに取り付けた切削ビットに先行する切削や攪拌混合は、その部分に行なわれる添加材注入によって、切削と攪拌混合が同時に行なわれることから、泥土化を促進し、カッタースポークの回転による切削ビットでの地山の切削に先立って、切羽中央付近の土砂流動を促進する。また、図 4-46 に示すような切削ビットによる段差構造を持つシールド機を用いる場合は、切羽部分に添加材と掘削土の攪拌混合に十分な空間を与えることから、掘削土の泥土化に有効であると考えられる。しかしながら、掘削される地山には、もともと間隙水があり、この部分で地山間隙水と添加材と掘削土が混じりあい、地山間隙水が占めていた部分を添加材が占めることになるため、掘削土中の間隙水が泥土化の過程で分離されて、泥土化には用いられない余剰水になっていくものと推測される。

良好な泥土では、この余剰水は、泥土として排出されないことから、地山内に戻されることになると考えられる。この地山への水の還元に対して、添加材注入圧と掘進中の推進力に起因する泥土圧とビット圧が関係していると考えられる。地山への掘削土中の間隙水の還元については、4.6.1 および 5.2 で後述する。

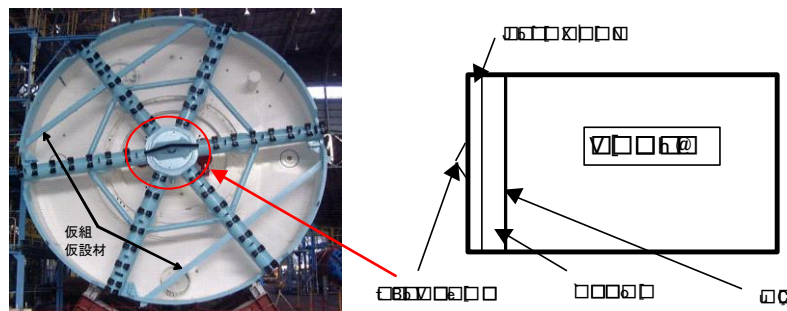


図 4-45 フィッシュテール

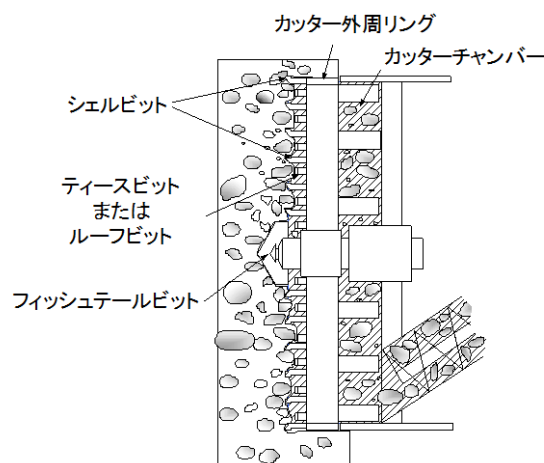


図 4-46 切削ビットによる段差構造を持つシールド機

b) 一般の地山切削状態の場合の泥土化

添加材注入とともに行われる地山は、ビットが直接地山を切削する場合（理想的な切削状態とする）を除き、ほとんどの場合が泥土と地山の間に掘削土砂と地山間隙水、さらに、添加材が混合した状態の材料がある状況と推測される。このような状況では、掘削土砂がばらけて添加材が掘削土砂の土粒子間に入りこみやすい状況ができあがっていると思われる。この状態で攪拌混合が始まり、チャンバー後部からの排土につれて攪拌混合される土砂が泥土になりながら切羽から後方に移動していく。

粘性を有する添加材はその圧力だけでは土粒子間に入りにくく、均質な泥土はできにくい。攪拌混合が効率的に行われるためには、土粒子が完全にばらけた状態になる必要があり、一般の地山切削時の土の状態はこのばらけた状態に近いといえる。このばらけた土粒子と添加材の混合過程は、土粒子間に添加材が浸入していく場合と攪拌混合により土粒子に添加材が付着していく場合の2つが考えられ、その両方を通じて、図4-44に示すような土粒子間を添加材が埋める状態ができる。

泥土化のための攪拌混合は加圧下で行われ、既にできあがった泥土は透水性が低いいため攪拌混合の過程で泥土化に用いられない地山の間隙水と添加材の余剰水は、切羽部分に集まってくることになる。

一方、斎藤ら²⁰⁾の研究から地山には添加材と置換される有効間隙率があることが示されており、この有効間隙率を越える量の添加材が注入された場合には、添加材そのものの水分が余剰状態になることもある。なお、一般的に帯水砂層において用いられる添加材の量は種類により異なるが、地山土量に対して体積比で概ね25～30%であることを勘案すると、添加材は初期地山の有効間隙より多い量が注入されることになる。これはカッタービットによる切削とチャンバー内での攪拌・混練により地山の有効間隙が増加することによるものと推定される。添加材のような粘性が高い混合水やゾル状の物質は、高圧のもとでは、地山に浸入するものも一部あるとしても、一般の泥土圧程度の低い圧力では地山に浸入しにくいものと考えられ、この余剰状態の水分も切羽部に集まってくることになる。

以上のように推論を進めると、地山土砂、間隙水、添加材が攪拌混合されて、地山間隙水と添加材が置き換わり、その過程で地山の間隙水と添加材の余剰水が泥土から分離していく現象が掘進・排土とともに連続して進む過程が泥土化の過程と言える。その過程については、添加材の性質と役割が大きく関係し、できあがった泥土の性質にも大きな影響を与えると考えられることから、泥土化のプロセスについても、前述の泥土性質、添加剤の性質と同様に、別途、第5章において詳しく検討する。

b) 一般の地山切削状態の場合の泥土化

添加材注入とともに行われる地山は、ビットが直接地山を切削する場合（理想的な切削状態とする）を除き、ほとんどの場合が泥土と地山の間に掘削土砂と地山間隙水、さらに、添加材が混合した状態の材料がある状況と推測される。このような状況では、掘削土砂がばらけて添加材が掘削土砂の土粒子間に入りこみやすい状況ができあがっていると思われる。この状態で攪拌混合が始まり、チャンバー後部からの排土につれて攪拌混合される土砂が泥土になりながら切羽から後方に移動していく。

粘性を有する添加材はその圧力だけでは土粒子間に入りにくく、均質な泥土はできにくい。攪拌混合が効率的に行われるためには、土粒子が完全にばらけた状態になる必要があり、一般の地山切削時の土の状態はこのばらけた状態に近いといえる。このばらけた土粒子と添加材の混合過程は、土粒子間に添加材が浸入していく場合と攪拌混合により土粒子に添加材が付着していく場合の2つが考えられ、その両方を通じて、図4-44に示すような土粒子間を添加材が埋める状態ができる。

泥土化のための攪拌混合は加圧下で行われ、既にできあがった泥土は透水性が低いいため攪拌混合の過程で泥土化に用いられない地山の間隙水と添加材の余剰水は、切羽部分に集まってくることになる。

一方、斎藤ら²⁰⁾の研究から地山には添加材と置換される有効間隙率があることが示されており、この有効間隙率を越える量の添加材が注入された場合には、添加材そのものの水分が余剰状態になることもある。なお、一般的に帯水砂層において用いられる添加材の量は種類により異なるが、地山土量に対して体積比で概ね25～30%であることを勘案すると、添加材は初期地山の有効間隙より多い量が注入されることになる。これはカッタービットによる切削とチャンバー内での攪拌・混練により地山の有効間隙が増加することによるものと推定される。添加材のような粘性が高い混合水やゾル状の物質は、高圧のもとでは、地山に浸入するものも一部あるとしても、一般の泥土圧程度の低い圧力では地山に浸入しにくいものと考えられ、この余剰状態の水分も切羽部に集まってくることになる。

以上のように推論を進めると、地山土砂、間隙水、添加材が攪拌混合されて、地山間隙水と添加材が置き換わり、その過程で地山の間隙水と添加材の余剰水が泥土から分離していく現象が掘進・排土とともに連続して進む過程が泥土化の過程と言える。その過程については、添加材の性質と役割が大きく関係し、できあがった泥土の性質にも大きな影響を与えると考えられることから、泥土化のプロセスについても、前述の泥土性質、添加剤の性質と同様に、別途、第5章において詳しく検討する。

4.5 掘進時、掘進停止時のシールドから地山への作用

4.5.1 推進力の作用

土圧式シールドでは、泥水式シールドと異なり、掘進中に切羽の安定を図る泥土圧を発生させる機構が掘進と同一のシステムである、推進力をもとにしているという特徴を有している。一方、この推進力は泥土圧として以外にも地山に対して作用力を及ぼしている。

その作用力は、

- (1) 泥土圧
- (2) ビット圧
- (3) その他

であり、掘進中の土圧式シールドの地山への作用とそれに対する地山挙動とその発生メカニズムを明らかにするためには、これらの作用力の地山への作用のメカニズムを明らかにすることが必要である。ただし、土圧式シールドの一部では、いまだに面板を用いる例も散見するが、土圧式シールドの基本を泥土による切羽安定に置く立場から、面板は無いものとして議論を進める。

なお、その他の作用として、推進力の切羽全面に対する不均一性や変動、シールド機のくせや地盤特性に起因するシールド機の姿勢（ピッチング等）制御のための力、シールドスキンプレートと地山の摩擦による力も推進力を源として実際の施工では地山に作用する。また、地山に作用する推進力は地山掘進中の地山切削、切削土のチャンバー内への取り込み、泥土化のためのチャンバー内の攪拌・混合や排土に伴うマシンの動的挙動による変動の影響を受けるものと考えられるが、ここでは、これらの影響を含んだ形で、推進力の作用のうち切羽における作用を考え、推進力の作用を泥土圧とビット圧の2つとして取り扱う。

さらに、推進力の作用は、カッタースポークに取り付けられたカッタービットばかりでなくフィッシュテール（フィッシュテールビットともいう）を介して地山へ作用することになるが、ここでは、このフィッシュテールを介して地山に作用するビット圧についても、カッタービットが取り付けられたカッタースポーク部におけるビット圧の作用に含めて取り扱う。

4.5.2 ビット圧の作用とその作用環境

シールドマシン前面に装備されたカッタービットやフィッシュテールが地山に押しつけられながら掘進していく機構が、切羽面に対して何らかの作用力を及ぼしていることは容易に想像できる。しかしながら、真にビット圧が作用しているのか、またその量についての明確な測定例は報告されていない。

ここでは、つくばトンネルでの掘進初期段階のジャッキ推進力、泥土圧、カッタートルク、ジャッキストローク等のデータをもとにした分析、鈴木²³⁾によるデータ分析、さらに、土圧式シールドの開発時に加島²⁴⁾が行った実験データ（未公表）をもとに、ビット圧の存在とその泥土圧やシールドマシンと地山の摩擦力との相対的な大きさを分析するとともに、ビット圧が作用する切羽面の環境について考察する。

(1) 掘進開始初期段階の掘進データによる分析

掘進停止中は、フィッシュテールやカッタービットは地山に多少なりとも食い込んだ状態か、あるいは、地山と接触した状態にあり、さらに、その周りには、泥土や泥土化されつつある切削土が添加材や地山の間隙水とともに充満している状態にあると考えられる。

図4-47には、つくばトンネルで3秒間隔で計測された総推力、泥土圧、カッタートルク、推進ジャッキストローク、ジャッキスピード、カッター回転数、スクリーコンベヤーゲート開度の掘進開始から安定した掘進状態に至るまでの変化を示してある。

この図4-47の(c)および(d)の総推力の変動に従って、掘進開始時の掘進状況を推定すると、次のようになる。

① a点で掘進が開始される。

② b点は掘進開始により初めて記録された推進力の値である。

また、カッター回転数は、b点で一定の回転数でスタートしている。カッタートルクは、このb点を過ぎると直後に低下する。この原因としては、次のことが推定される。

ア) 「停止中のビットの地山への食い込み」及び「静止状態の泥土」の抵抗によりb点に示すカッタートルクとなる。

イ) ジャッキストロークが伸び始めていないことから、掘進停止状態でのカッタースポークの回転となる。

ウ) そのカッターディスクの回転に伴って食い込み部分が切削されてカッタートルクは減少する。

エ) 合わせて、回転が続くにつれて、「動的状態」へ泥土の性状が変わることによってトルク値が徐々に低下する。

③ b点からc点では、総推力は些少ながら上昇する一方、カッタートルクは②で示した状態が継続して低下を続ける。

④ c点で泥土圧の上昇が始まる。

⑤ c～d点までの間で、推進力の作用により掘進停止中に低下していた泥土圧が所定の圧力まで上昇する。

- この間においては、カッタートルクは低下傾向を示したままであり、ビットはこの段階では、地山に食い込んでいないものと考えられる。

- したがって、未だ地山切削によるチャンバー内への掘削土の取りこみは行われていないものと推定される。

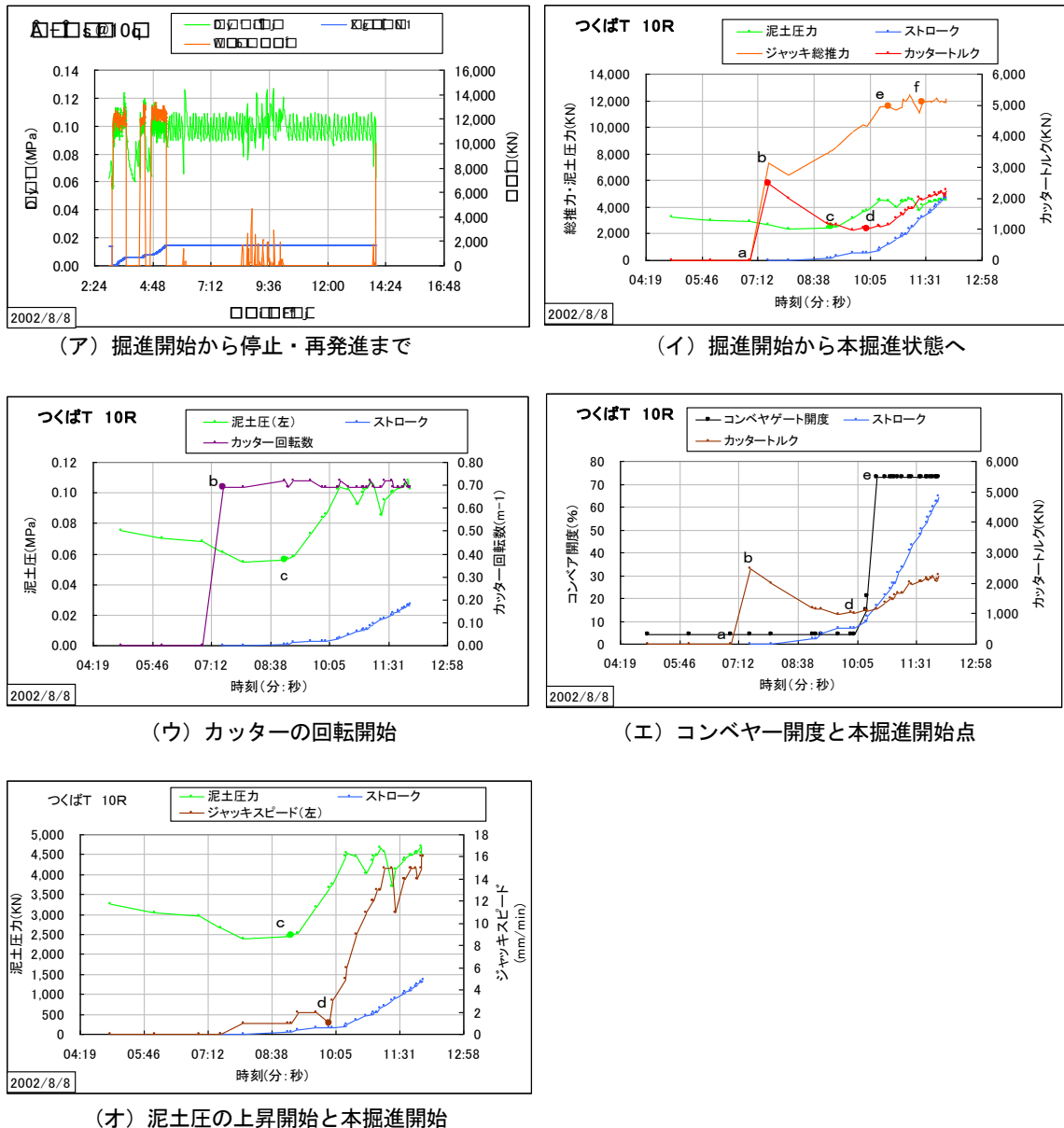


図 4-47 掘進開始からのシールド掘進データの変化（つくば T）

- 泥土圧を上昇させるために「チャンバー内容積を圧縮させている」ことになり、切羽部では、カッターディスクと地山との接触が強くなるものと考えられるが、カッタートルク値の減少が継続していることから「切羽近傍の地山は前回の切削により攪乱されてゆるんで軟弱になっている」、「泥土圧の上昇のため推力により地山に押しつけられている切羽近傍の泥土の中から、軟弱な性状分が切羽部に押し出されている」状況もあいまって、カッタートルクが漸減または、増加しないものと推測される。
- ⑥ d 点からは、スクリーコンベヤーゲート開度70%として本格掘進へ移っていく。
- ⑦ d 点からe点は、本格掘進状態へと移行しつつある過渡期であり、泥土圧が管理設定値

に近づくにつれて、カッター回転に対する抵抗の減少が止まり、増加に転じることになる。

- ⑧ したがって、d 点付近からは、地山の本格切削に必要な掘進速度に上昇させるために、カッターにスラストがかかり始めたものと考えられる。なお、カッタートルクの増加には、切削土と泥土の攪拌混合が本格化したことによる回転抵抗の増加も含まれるものと考えられる。
- ⑨ e 点からは、泥土圧の変動が推進力の変動とリンクしていることから、本格掘進状態となっていることがわかるが、カッタートルクの上昇は継続している。
- ⑩ f 点からはジャッキ推力がほぼ安定状態となっている。したがって、泥土圧が安定し、切削スラスト力も安定してきたものと考えられることから、カッタートルクが d 点から上昇し始めて、f 点までの間の推進力上昇分がビット圧として作用する推進力と考えられる。この量は、図4-48のB1で示され、約2,000kNとなる。
- ⑪ なお、他の測定事例では、カッタートルクの極小値が存在しない場合も見られる。このような場合には、泥土圧の上昇開始時刻 c 点から、泥土圧が所定の値になる時刻 e 点間の推進力の上昇量とその間の泥土圧力の上昇量との差をビット圧として作用する推進力と考えることができる。図4-47で試算すると、

推進力の上昇量=12,200-8,100=4,100kN

全泥土圧の上昇量=4,400-2,300=2,100kN

ビット作用力=4,100-2,100=2,000kN

となり、両者は概ね一致することになる。

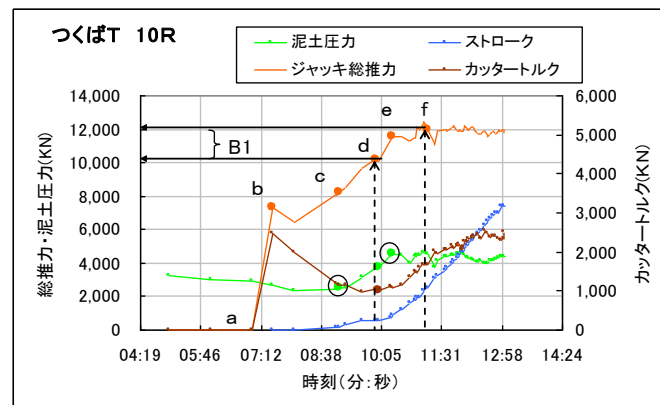


図 4-48 ビット圧として作用する総推力（つばT）

(2) 鈴木 の助言による分析によるビット圧

石川島播磨重工業(株)鈴木氏の助言²³⁾により、シールド掘進データからシールド機と地山の周面摩擦力を推定し、その値からビット圧を算出する。

a) 鈴木 の助言

鈴木 の助言は以下のようなものである。

「全ビット圧は（推進力－全泥土圧－シールド機と地山の周面摩擦力）で表される．カッター回転状態では，ビット圧はビット背面の地山を切削するのに使われる成分と地山を押しつける成分から構成されると考えられ，カッタートルクがゼロのときには，この成分のうち，地山を切削するのに使われる成分がゼロとなるものと仮定できる．したがって，施工データから得られるカッタートルクと（推進力－全泥土圧）を図4-49のように表すことで，両者の回帰直線が縦軸（推進力－全泥土圧）と交わる点がシールド機と地山の周面摩擦力を示す値となる．」これにより周面摩擦が求まると，上記の計算により全ビット圧を求めることができる．

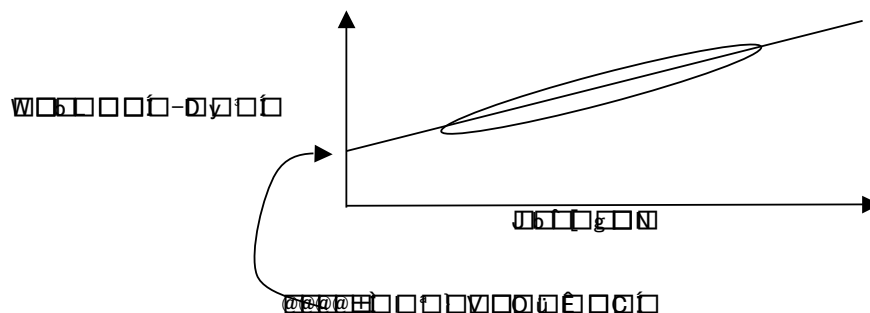


図4-49 カッタートルクと（推進力-全泥土圧）との関係

b) 分析結果

この考え方にもとづいて，常磐道トンネル，つくばトンネル，瀬古トンネルの掘進データを整理すると表4-5と図4-50のようになる．

表4-5 シールド機と地山との周面摩擦力および全ビット圧
シールドマシンと地山との摩擦の試算

		土質	天端水頭 (m)	① 外径 m	② マシン長m	③ 断面積 m2	④ 外周面積
常磐道T	泥土圧	砂質		7.45	8.32	43.59	194.7
C先行			1	7.45	8.32	43.59	194.7
C後行			1	7.45	8.32	43.59	194.7
D先行			1	7.45	8.32	43.59	194.7
D後行			1	7.45	8.32	43.59	194.7
つくばT	泥土圧	砂質		7.45	8.43	43.59	197.3
57k125先行			2	7.45	8.43	43.59	197.3
57k125後行			2	7.45	8.43	43.59	197.3
瀬古T							
味鋺工区交差部	泥土圧	砂礫	17	7.15	7.79	40.15	175.0
上飯田工区交差部	泥土圧	砂礫	17	7.15	7.93	40.15	178.1

	掘進速度 (mm/min)	掘削断面積 (m ²)	掘削力 (kN)	掘削力 (kN)	掘削力 (kN)	掘削力 (kN)	掘削力/掘削断面積 (kN/m ²)	掘削力/掘削断面積 (kN/m ²)	掘削力/掘削断面積 (kN/m ²)
常磐道トンネル									
つくばトンネル									
常磐道トンネル	13~15	195	8,700	4,000	1,800	2,900	9.2	75.0	0.12
つくばトンネル	15~17	195	8,770	4,300	2,200	2,270	11.3	75.0	0.15
常磐道トンネル	15~19	195	8,500	5,100	2,200	1,200	11.3	87.3	0.13
つくばトンネル	25~28	195	9,200	5,200	3,700	300	19.0	87.3	0.22
常磐道トンネル									
つくばトンネル									
常磐道トンネル	57~25	16~20	10,500	4,200	2,100	4,200	10.6	100.9	0.11
つくばトンネル	57~25	29~36	16,000	6,700	6,700	2,600	34.0	100.9	0.34
常磐道トンネル									
つくばトンネル									
常磐道トンネル	34~35	175	17,000	11,000	3,200	2,800	18.3	107.3	0.17
つくばトンネル	38~43	178	23,200	14,200	4,400	4,600	24.7	107.3	0.23

掘削力/掘削断面積 (kN/m²) = 掘削力 (kN) / 掘削断面積 (m²)

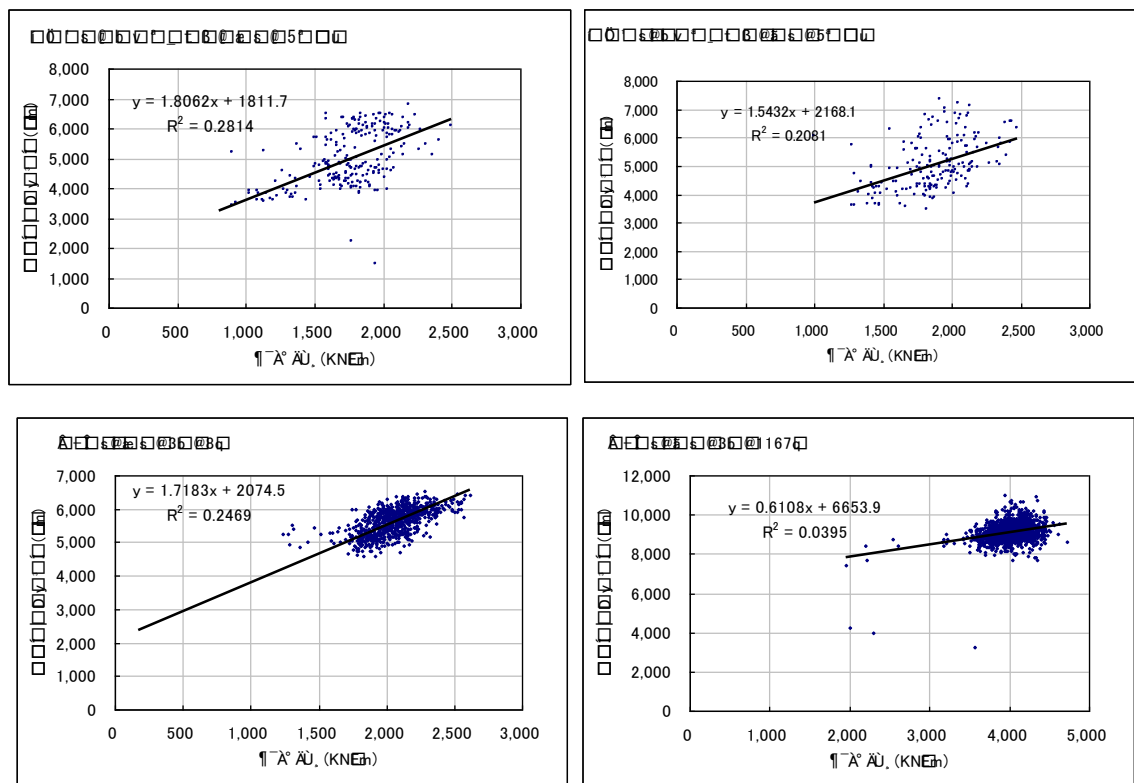


図 4-50 カッタートルクと（推進力-全泥土圧）との関係（常磐道T, つくばT）

いずれのトンネルでも、掘進速度の増加に伴ってジャッキの推進力は増加しており、その掘進中の変動幅は概ね 3,000kN 程度であり、表にはその平均値を示した。常磐道トンネル D 断面およびつくばトンネルでは、後行施工時に推進力が増高しているが、これは、砂層掘削による胴締めなど、後行特有の影響も考えられる。一方、瀬古トンネル（上飯田

工区)では、高めの泥土圧を管理圧と設定したことに起因すると考えられる味碗工区より大きな推進力での掘進が行われているが、常磐道トンネルの後行と同様、後行施工時の推進力の増高も認められる。

また、表4-5には、掘進速度と地山鉛直方向圧力を緩み土圧と想定した場合の計算上のシールド機と地山の摩擦係数も示しているが、つくばトンネル後行および瀬古トンネル(上飯田工区)では、掘進速度増加による影響が明瞭に現れている。このことから、掘進中のシールド機と地山の周面摩擦は、地山とシールド機の材料(鋼材)に関して常数により一義的に定まるものではなく、掘進速度に応じて変動するものと推定できる。

一方、総推進力から全泥土圧とシールド機と地山の周面摩擦力を引いた残りの力として得られる全ビット圧は、表4-5から総推進力の2～3割程度の値を有するものと考えられ、これを、単位面積当たりのビット圧に換算すると泥土圧と同程度かそれ以上の大きさの高圧な作用圧と考えてもよいと推定できる。

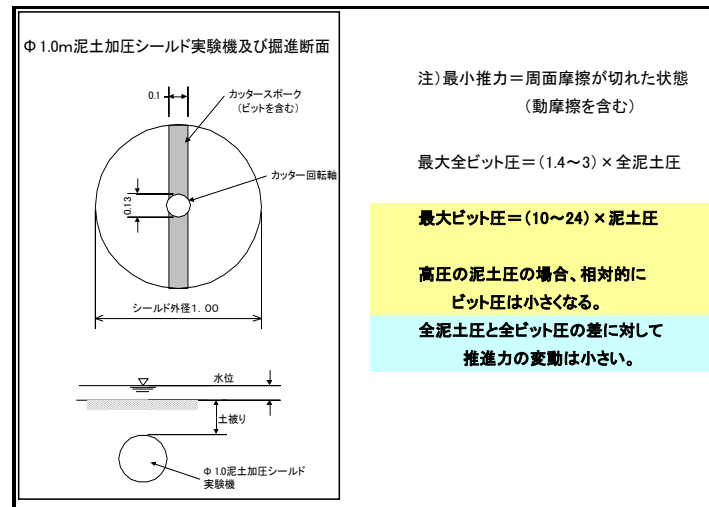
(3) 加島らの実験

加島ら²⁴⁾は、表4-6(付図)に示すような直径1mの一文字形のカッタースポークを持つ土圧式シールドの模型機で、砂、シラス、砂礫の3種類の土砂で4回の掘進実験を行い、推進力、泥土圧を測定した。掘進中の推進力の最大値は、ほぼ掘進開始時に生じ、順調な掘進時には最小の推進力を示した。

表4-6 泥土圧とビット圧の比較(模型実験結果)

Φ1.0m泥土加圧シールド実験機による掘進実験データ						
項目	単位	実 験 デ ー ター				備 考
実験ケース		A	B	C	D	
① 地盤		砂	シラス	砂礫	砂礫	
② 土被り	m	1.0	1.05	0.6	0.9	
③ 水位	m	GL+0.1	GL+0.3	GL+0.4	無 し	
④ 推力最大	kN	64	76	51	89	
⑤ 推力最小	kN	46	64	38	64	
⑥ チャンバー内泥土圧	MPa	0.025	0.03	0.018	0.02	
⑦ チャンバー内全泥土圧	kN	20	24	14	16	
⑧ ⑤-⑦(全ビット圧)	kN	26	40	24	48	
⑨ ⑧÷Ac	MPa	0.26	0.4	0.24	0.48	カッタースポーク面圧
⑩ (④-⑤)÷(シールド周面積)	MPa	0.01	0.005	0.005	0.01	地盤とシールド筒の摩擦抵抗値
⑪ ビット圧/泥土圧	⑨/⑥	10.4	13.3	13.3	24.0	
⑫ 推進力変動	④-⑤	18	12	13	25	
⑬ 全ビット圧と全推進力変動	⑧/⑫	1.4	3.3	1.8	1.9	
備考	掘進長 0.8m カッタースポーク断面積 $A_c=0.1\text{m}^2$ カッタースポーク幅 $B=0.1\text{m}$ 回転軸径 $d=0.13\text{m}$ シールド筒周面積 $A_s=\pi \times 1.0 \times 0.8=2.51\text{m}^2$					

(付図)



掘削対象地盤が粘性土ではないことを考慮すると、最小の推進力は、泥土圧、ビット圧とシールドマシンと地山の動摩擦状態の摩擦力から成るものと考えられ、動摩擦状態のビット圧相当分の推進力は、表中の⑧で表される。また、表中の⑫で表される推進力の最大、最小の差は、シールド機と地山の静止摩擦係数と動摩擦係数の差によるシールド機と地山の周面摩擦力の差と考えられ、しかも、この摩擦係数の差は、静止摩擦係数と同等かそれ以下と考えられることから、全ビット圧の最大値は、最大推進力ー推進力変動ー全泥土圧＝最小推進力ー全泥土圧で表される。したがって、表中⑪で示される値が最大のビット圧と泥土圧の比と考えられることから、ビット圧は泥土圧よりかなり大きな圧力として作用していることが推定できる。

(4) ビット圧の作用環境（地山とシールドの接触環境）について

切羽面での地山の切削状況は、理想的には、フィッシュテールやカッタービットによって地山が削られる状況であると考えられるが、(1)、(2)、(3)で示したように、ビット部では、大きなビット圧が作用することになり、実際の地山は削られる前に圧壊される可能性が大きいと推定される。このような状況が発生しているか否かについて、粘性土に対する掘削時の例ではあるが、JR 東西線福島シールドと阪神電鉄の阪神シールドの事例から考察する。

a) JR東西線福島シールドの例

このシールドは、軟弱粘土中を土圧式シールドで添加材注入を行わずに掘進した例である。図 4-15 に示した位置関係で掘削断面内に地山の土圧を測定する土圧計を設置して、切羽掘進方向の全土圧を測定している。図 4-51 には、先行シールドが計測断面を通過するときの測定値を、図 4-52 には、計測断面とシールド切羽の離れの関係に図 4-51 の計測データを再整理して示している。また、図 4-53 には、図 4-51 の拡大図を示した。

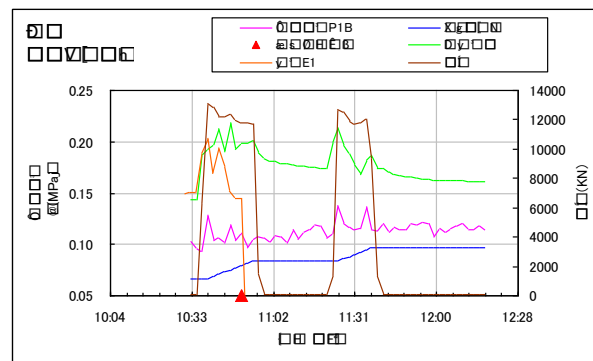


図 4-51 先行シールド通過時の各測定値（福島シールド）

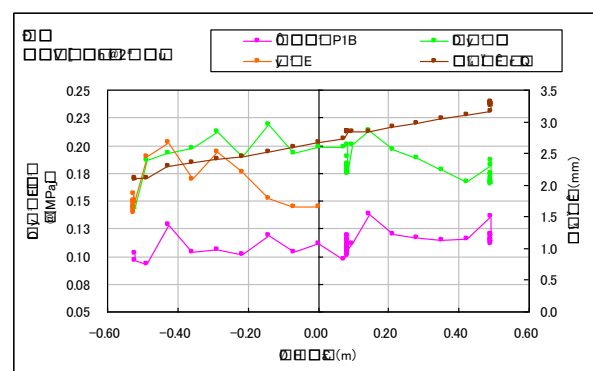
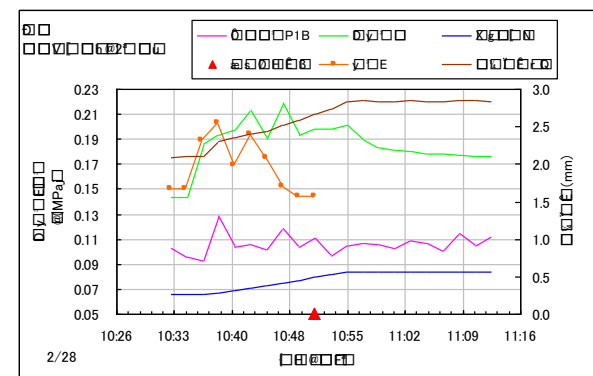


図 4-52 先行シールド通過時の各測定値の切羽の離れとの関係（福島シールド）

図 4-53 先行シールド通過時の各測定値（福島シールド）
〔図 4-51 の拡大〕

これによれば、切羽距離が概ね-30cm 地点、すなわち、切羽が計測断面の約 30cm 手前まで来た時点からそれまで変動していたものの、 $18\text{N}/\text{cm}^2$ 以上を維持していた地山の土圧が低下し始め、10cm 手前に達した時点では、ほぼ極小値 $15\text{N}/\text{cm}^2$ を示して、そのまま、シールド機の掘削により計測を終了している。この間、泥土圧は変動するものの、 $19\text{N}/\text{cm}^2$ 以上の値を示しており、低下はしていない。

このことは、切羽が 30cm 程度の近くに到達すると、地山に泥土圧やビット圧が効果的に作用する環境ではなくなることを示しているものと考えられ、この状態は、シールド機による地山の掘削によって切羽前方 30cm 程度まで緩んだ状態が発生したことを反映しているものと推定される。

b) 阪神電鉄阪神シールドの例

図 4-18 には、阪神シールドにおける計測断面の各種計測機器の配置および、地質の状況を示している。このシールドは、直径約 10m の大断面土圧式シールドであり、軟弱粘土中を気泡を用いて掘削している。ここでは、地山間隙水圧計（P2, P3）が掘削断面内に、地山土圧計（E1）がシールド天端直上 0.5m 位置に設置され、シールド掘進方向の全土圧を測定している。

2 分間隔での測定結果を図示すると、図 4-54 のようになり、さらに、このうち、P2 と P1 および E1 について、切羽との離れとの関係で示すと図 4-55 (1) となる。掘削断面内に位置する地山間隙水圧計 P2 と P3 は切羽通過とともに計測を終了している。P2, P3 は、切羽が約 10cm の地点まで近づいた時点以降、 $4\sim7\text{N/cm}^2$ も間隙水圧が低下していることがわかる。また、同時期に P1 も低下していることが、図 4-55 (2) からわかる。

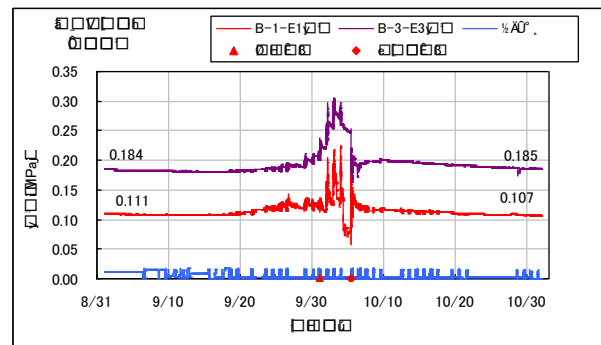


図 4-54 シールド掘進に伴う各測定値の変動（阪神シールド）

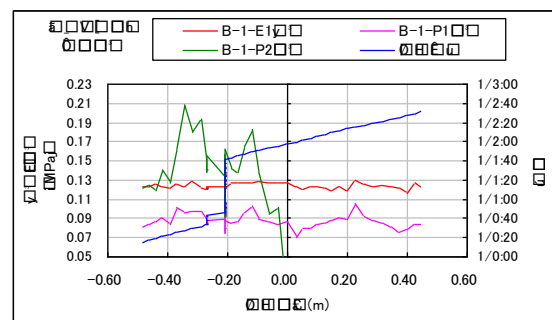


図 4-55 (1) 地山土圧および間隙水圧測定値の切羽の離れとの関係
(阪神シールド)

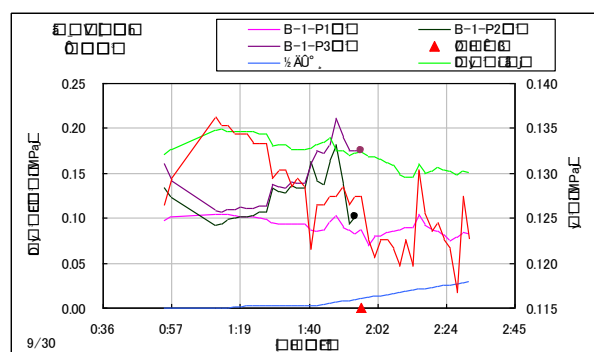


図 4-55 (2) 地山土圧および間隙水圧測定値の変動
(阪神シールド)

このことは、a)で示した福島シールドと同様、切羽前方では、一種の地山の崩れや緩みが発生して、切羽からの泥土圧やビット圧が直接地山に作用しにくい環境が発生していることを示すものと考えられる。P1の低下量が小さいのは、P1がシールド中心部に近く、周辺部に比べて、フィッシュテールの回転に伴う推進力作用の影響を受けやすい環境にあることに起因していると考えられる。

a), b)の計測事例から、シールド切羽においては、フィッシュテールや切削ビットによって地山が削られるという理想的な切削状況ではなく、図 4-56 に示すようなビット圧の作用とビットによる切削によって、切羽前方地山が崩されて緩んだ状態となっている攪乱ゾーン（混合領域）を介してビット圧や泥土圧が作用する環境となっているものと考えられる。

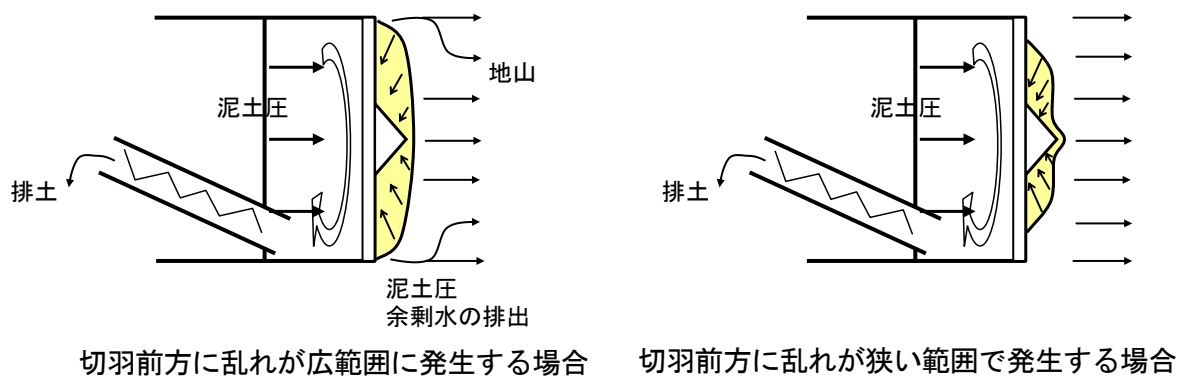


図 4-56 切羽部分での圧力の作用状況

(5) ビット圧作用の本論文での取り扱い

(1)から(3)までの分析結果から、ビット圧の作用については、おおよそ総推進力の 20% 程度が全ビット圧として地山に作用しているとみなせ、ビット単体の圧力としては、泥土圧以上の高压となっているものと考えられる。しかしながら、(4)に示したように、一方で

は、その圧力とシールド機の切削機構によって、しばしば、地山は壊され、ビット圧のすべてが直接地山に作用しない環境が生じているものと考えられることから、本論文では、以下に述べることを考慮してビット圧を取り扱う。

ビット圧はシールド機のフィッシュテールを含むビットやスポークを介して切羽に作用し、地山の切削に機能するほか、切羽面に局所的な加圧力として作用する。また、この作用圧はカッタースポークの回転に伴い、切羽全面に周期的、断続的に作用する。

作用が、切羽の半径方向に複数の線状であること、その線上の加圧範囲が周期的に回転・移動すること、さらに、圧力が泥土圧に比べて高压であるという特徴を持つ。

しかしながら、ビット圧が地山へ作用する切羽における環境は、この高压のビット圧が常に地山に直接作用しているわけではなく、図 4-57 に示すような、ビット圧が直接作用する領域と緩んだ地山を介して地山に作用する状態の領域が掘進開始時、掘進中に変化しながら施工が行われているものとする。

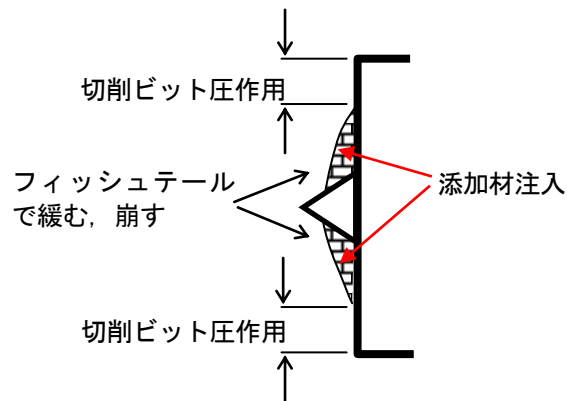


図 4-57 ビット圧が直接作用する領域と緩んだ地山を介して作用する領域。

4.5.3 添加材注入圧の作用

添加材の注入圧は、掘進中あるいは掘進停止時にフィッシュテールあるいはカッタースポーク外周部や中間部および隔壁部に配置した注入孔から注入される添加材によってフィッシュテールやカッタービット付近を中心とする地山と泥土の間に作用する圧力で、この圧力の作用は地山および泥土に対して影響を及ぼすと考えられるが、その影響がどのような影響なのか、その影響の範囲や影響度ならびに影響のメカニズムについては明らかになっていない。

図 4-58 には、掘進中および掘進停止中の各注入系統別の添加材注入圧と泥土圧、地山間隙水圧、地盤沈下の関係を示すが、掘進中の添加材注入圧と泥土圧の変動には明確な連動は見られないが、掘進停止中には、1系からのみ注入がなされており、注入圧は泥土圧の維持、上昇に寄与していることがわかる。また掘進中には、注入される位置の局所的な条件により大きな影響を受け、その大きさが泥土圧以上で約 2～3 倍のかなり高压になること、その影響範囲が切羽全面には至らないという特徴を持つことがわかる。

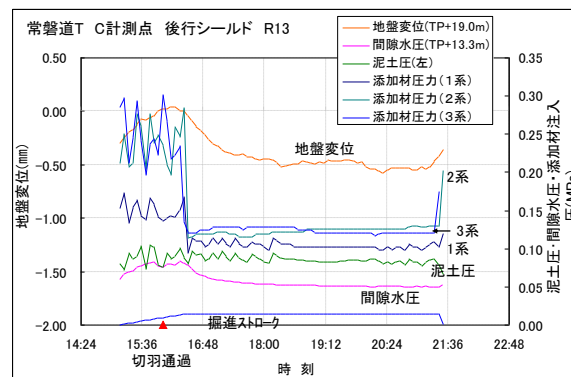


図 4-58 掘進停止中の添加材注入と泥土圧、
地山間隙水圧および地盤変位の関係

また、添加材の注入は、掘進中と掘進停止中では、注入する系統を変えて実施することがよく行われる。掘進中はフィッシュテール部やカッタースポーク部から注入を行い、掘進停止中の泥土圧低下防止や低下した泥土圧を上昇させる目的で実施する場合は隔壁部から行うことが多い。常磐道トンネルでは、添加材注入量の 60% をフィッシュテール部から注入している。添加材が注入される切羽部の環境は、4.5.2 で示したように、泥土やビットが新鮮な地山に接触した環境ばかりでなく、泥土と新鮮な地山の間に、緩んだり崩れたりした地山や添加材が混合した状況と考えられることから、添加材注入圧は、この環境の混合状態の圧力を増大させるように作用するものとする。

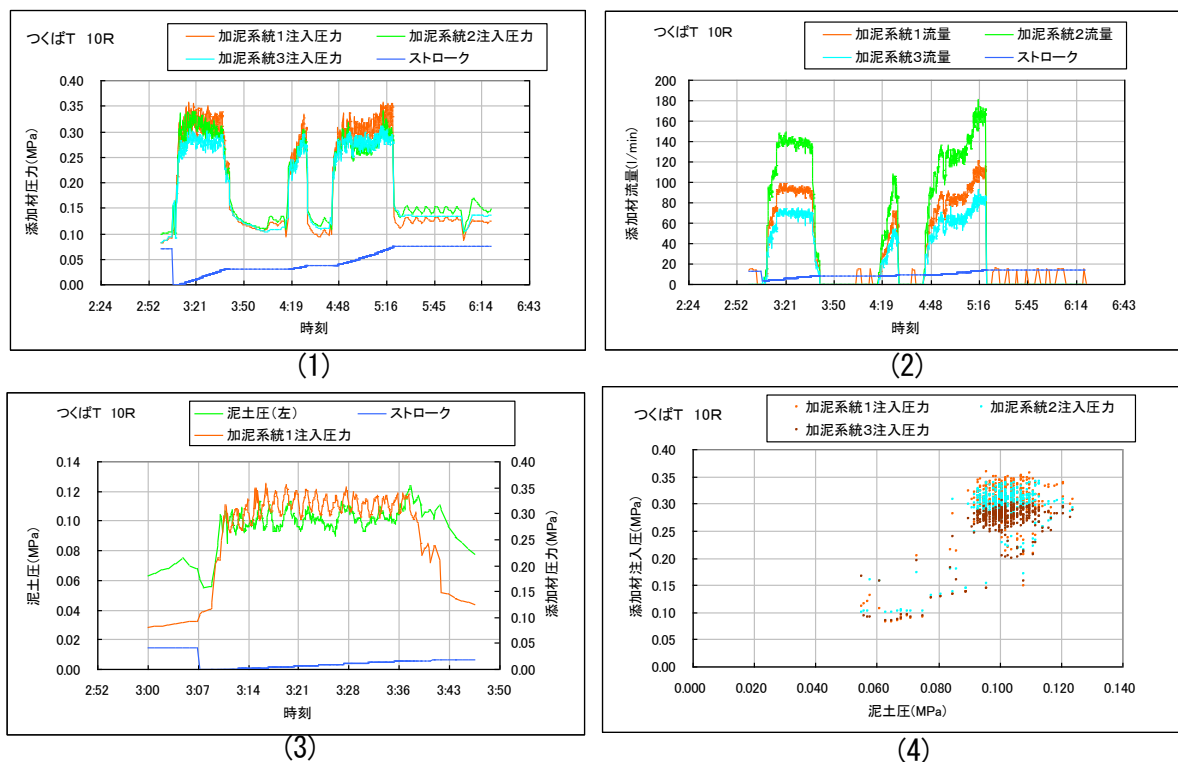


図 4-59 添加材注入圧と泥土圧との関係

このことは、添加材注入中の泥土圧と各系統の添加材注入量と注入圧の測定値の例を示す図 4-59 から裏付けられる。図 4-59 (3) は、掘進中の最も添加材注入圧の高い系統の注入圧の変動と泥土圧の変動を示しているが、添加材注入圧の変動と泥土圧の変動は必ずしもリンクしていないように見えるが、注入圧の増減同様、泥土圧も小刻みな変動を示している。また、添加材注入圧の変動量がそのまま泥土圧の変動量になっていない。これらのことから、添加材注入の作用は泥土圧の上昇には寄与しているものの、それによる泥土圧の上昇量は添加材注入圧や量、注入場所と泥土圧測定位置などの要素が複雑に絡んで容易に特定できない。

添加材注入圧は、添加材の種類、地山と泥土圧の状態や注入孔からの吐出量等により変化するが、本論文では、図 4-59 のように、添加材注入圧の最大値が 0.3MPa 程度ということ念頭において考える。ここでは、添加材を用いて泥土化された泥土を対象として、掘進中および掘進停止中の添加材注入圧の作用とその影響についてのメカニズムを検討する。

4.5.4 泥土圧の作用

泥土圧は地山の掘進中および掘進停止時に切羽面に作用し、切羽を安定させ、切羽のシールド側への変形を抑止する。その作用は地山の切削から切削土の泥土化、排出に至る過程で泥土の性状や特性と泥土の持つ圧力に依存する。また、作用がほぼ切羽全面であるという特徴を持つ。

泥土圧は、理想的には、泥土化によって不透水化した泥土の圧力を直接未掘削の地山に作用することになると考えられるが、4.5.2、4.5.3 で示したシールドと地山の切羽における接触環境を反映して、このような理想的な作用状態ばかりでなく、泥土と地山の間にある切削された、あるいは、緩んだ地山の土砂と添加材の混合した状態を介して地山に作用する形になっていると考えられる。

地山の切削、緩み、添加材の注入は、掘進に合わせて場所を変えながら連続して行われることから、接触環境も変化する。したがって、切羽では、掘進に伴う切削、地山の緩みに伴う地山内間隙水圧の低下や添加材注入圧による圧力の上昇、シールドの推進力の変動に伴うビット圧や泥土圧の変動、さらには、チャンバー内土砂のスクリーコンベヤーからの排出による変動など、様々な要因が複雑に影響した状況を反映した結果として測定される泥土圧が地山に作用していると考えられる。実際に測定される泥土圧は、隔壁に設置された土圧計によるものであることを考慮すると、切羽における地山に作用している泥土圧の状況を正しく反映しているかどうかは泥土の性状に依存すると考えられるが、泥土が前述の性質を有している適正な泥土である限り、切羽で作用する泥土圧の源としての泥土圧が測定されていると考える。

このようにさまざまな影響を受ける泥土圧は、その外的な影響に対する反応や、持っている圧力の外部に対する作用は、その性質に大きく依存すると考えられることから、別途、第5章で泥土の性質と泥土圧の作用・反作用のメカニズムについて考察するが、本論文では、泥土の性状や特性とそれに起因する泥土圧の作用については、適切な泥土状態の性状を有しているものと想定して地山への作用を考察する。

4.6 掘進と停止に伴う地山挙動

4.6.1 掘進中の地山への水の移動、地山間隙水圧と地山変位

(1) 地山への水の移動（地山への掘削土中水の排出）

砂質土などの透水性地山においては、掘進中の地山内では、図 4-60 に示すように、間隙水圧が上昇する状況が計測されている。また一方では、常磐道トンネル等では地山の間隙水を含む掘削土量に比較して、排土量から添加材注入量を控除した残量は 70%～75% 程度であることも計測されている。この現象の発生メカニズムを考察すると、以下のようなになる。

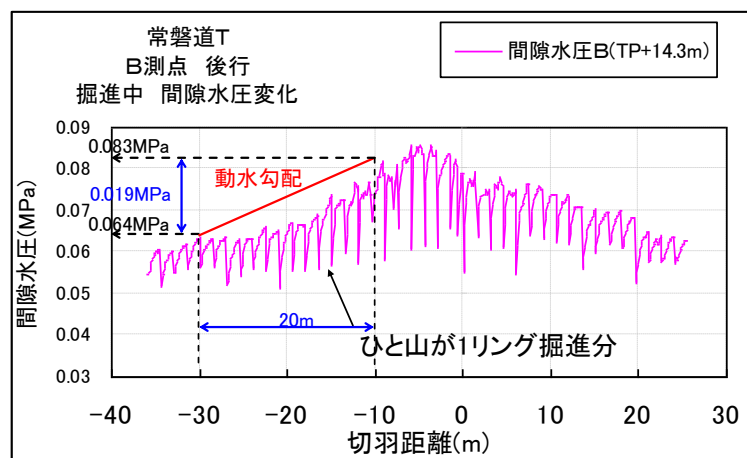


図 4-60 掘進に伴う地山間隙水圧の変動

1) 軟弱粘性土の場合

軟弱飽和粘性土における泥土化の過程では、前述のように、掘削土中の水はそのまま攪拌・混合されることになり、この過程でほとんどの土中水は泥土の中に取り込まれるものと考えられる。一般に、大気圧下で練り返した粘土は練り返しを止めて時間が経過すると、土中水が表面に出てくる。一方、チャンバー内は加圧されており、攪拌混合によって粘土内に発生した過剰間隙水圧の散逸過程で切削土中の水が圧力の低い地山側に移動することも考えられるが、掘削対象地盤も粘土で、地山そのものの透水係数も小さいことから、切削土中の水が、地山に排出されることはほとんどないと考えられる。飽和粘土では有効応

力の原理に従い、外力による加圧に対して間隙水圧が上昇してその圧力に対抗することから、地山に水が排出されなくても切羽で加えられた圧力に対して切羽地山の間隙水圧が上昇することになると考える。

2) 添加材注入が泥土化に必要な地盤の場合（砂・砂礫層の場合）

透水性地盤での模型実験からは切羽前方地山の水位が上昇することが確認されており²¹⁾、また、前述の図4-60のように、砂地盤の現場計測からも地山の間隙水圧の上昇が確認されている。栗原らの研究²⁰⁾、地盤内の間隙水圧以上の圧力で添加材を注入しながら掘進すると間隙水が地山側に排除されることが報告されており、透水性地盤では土圧式シールドの掘進に伴って、地山側への地下水の移動が発生しているものと考えられる。

この掘進過程における地山への水の移動は、掘削土の泥土化と密接な関係を有していると考えられる。それは、前述のように、砂質土などの透水性地盤の泥土化が、図4-44に示したように、水で満たされていた地山の間隙が添加材で置き替って達成されることが原因となっていると考えられるからであり、この泥土化の過程で、もともと地山に含まれていた間隙水が泥土から排除され余剰水となるものとする。

掘削土の泥土化を進めるために、砂質土においては、既に述べたように、ベントナイト泥水や高分子材料等を水と攪拌混合した添加材を切羽に注入する。この添加材は、対象となる地盤の特性に応じて適切に泥土化が行なえる粘性と比重の混合水で注入される。最も粘性の高い添加材が求められる地盤では、ベントナイトや高分子材料を十分に吸水膨張させて粘性が増した状態で注入する。この状態の添加材は難透水性を示し、チャンバー内の攪拌混合により掘削土の土粒子間の間隙に入り込み掘削土を泥土化する。したがって、この泥土は土粒子と難透水性の添加材で構成されることになり、泥土そのものが難透水材料になる。

また、有機セルロースからなるKTゲルを用いた施工時のSL付近のトンネル側方1m地点の採水による成分分析結果からは、KTゲルが確認されていないことから、4.4で推論したように、添加材中の添加剤は地山に排出されていないものと考えられる。

過剰な水分を含まない適切な性状の泥土で掘進が行なわれる場合、前述したように泥土化の過程で生じた余剰水は、泥土としては排出されないことから、切羽付近に集められ地山に排出されることになると考えられる。その排出を生じさせる作用をしていると考えられるのは、4.5の検討から次の3つとなる。

- (1) 添加材注入圧
- (2) 泥土圧
- (3) ビット圧

掘進中に変動する推進力の影響は、(2) 泥土圧および(3) ビット圧の変動として現れることから、4.5.1で述べたように、ここでは、この影響は泥土圧とビット圧について検討することとする。

a) 一般の切削状態の場合

一般の切削状態の場合は、理想的な切削状態に比べ、新鮮な地山と泥土の間にある掘削土と地山間隙水および添加材の混合した領域が発生している場合に相当すると考えられる。このような状態では、ビット圧が新鮮な地山面に直接作用する影響は小さく、ビット圧で地山内に直接余剰水を排出する効果は小さいと考えられる。しかしながら、この部分の高圧状態を生み出しているのは推進力であり、推進力の変化は、結果的には、ビット圧と泥土圧の変化としてこの部分に作用することになり、その圧力が隔壁に設置した土圧計で泥土圧として計測されることから、この泥土圧そのものが余剰水を地山に排出する原動力になっているものと考えられる。したがって、泥土圧と余剰水圧力の関係を明らかにすることが重要である。

一般に、切羽部分では、推進力に起因する泥土圧やビット圧は、4.5.2, 4.5.3 で述べた接触環境を考慮すると、図 4-57 に示す状況にあると考えられ、図の斜線の部分は、掘削土砂、地山間隙水、添加材で満たされており、この部分の圧力は泥土圧に等しいかそれ以上となっている。このことは泥土圧が、自身の持つ全応力を余剰水に伝達していることを物語るものと推定され、地山等の地盤材料の圧力の伝達機構と異なる性質を泥土が持っていることを示すものと考えられる。このような圧力伝達機構は、全応力的な力の作用と言うことができ、そのような機構を持つメカニズムは泥土化を通して形成されるものと考えられることから、泥土の性質と泥土化のプロセスとこの作用メカニズムについては別途第5章で深度化して検討する。なお、ここで用いた「全応力的な作用」とは泥土圧が一般の地盤材料の有効応力は有効応力で伝達され、間隙水圧は間隙水圧で伝達される伝達機構とは異なって、それらが一体となっているという意味の作用である。したがって、この混合水は、地山の間隙水圧以上の圧力で地山に接しており、一方、チャンバー内の泥土は透水性が小さいことから、加圧された水は間隙水圧の低い地山内に戻されることになると考えられる。また、泥土圧より高い圧力で注入される添加材はこの部分の圧力を上昇させる作用を及ぼすものと考えられる。

b) 地山への排出水量と浸透現象による周辺地山への水の分散量の検討

この排出された水の地山の中の動きについて考える。一般に、地山中で過剰間隙水圧を持った間隙水は、浸透現象によって分散していく。その浸透過程を簡略化したモデルで検討して、地山に排出された水の量が地山に発生している動水勾配ですべて地山に浸透していくかどうかを検討する。

図 4-61 に示すように切羽から 20m の球面を水の移動境界と設定する。この移動境界における平均的な動水勾配は、図 4-60 に示す切羽の位置と地山における間隙水圧の上昇曲線を用いて、その包絡線の勾配と仮定できる。それは、ここで記録された 1 箇所の間隙水圧変化はシールド推進力による泥土圧の作用、ビット圧作用の繰り返し、添加材注入圧の作用の結果発生しているもので、切羽距離との関係で表すことにより、全体で、ある時点の地山の間隙水圧分布に相当するものと考えられることによる。

したがって、地山の間隙水は、この動水勾配に従って設定された移動境界を通過して切

羽側から地山遠方に浸透することになり、1リングの掘進中に地山に浸透する水の量をこの動水勾配を用いて常磐道 T の掘進データおよび地質調査結果から計算してみると、表 4-7 のようになる。これによれば、地山に発生している動水勾配に基づく浸透だけで、注入された添加材で置換される地山の有効間隙率に相当する間隙水量が地山に排出されても、その水が十分地山に浸透していくことを示していることになる。

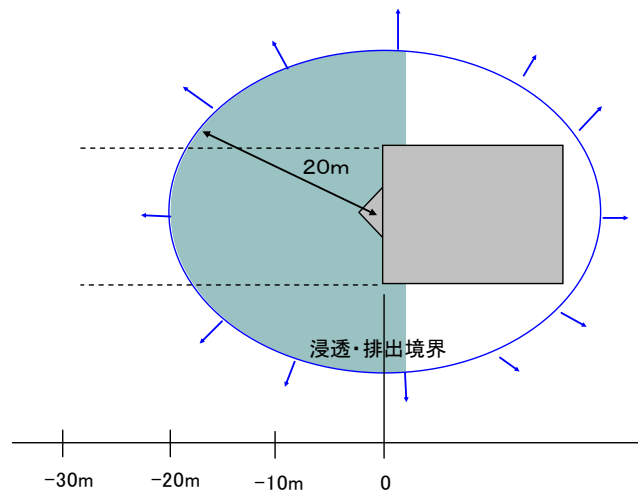


図 4-61 水の移動境界面積算出モデル図

表 4-7(1) 地山内の水の移動境界の大きさ

項目		数量	備考
1リングあたりの掘削土量	V	65.4 m^3	シールド外径7.45m, 掘進長1.5m
1リングあたりの掘削土中の水量	V_w	29.3 m^3	自由水+吸着水
1リングあたりの掘削土中の間隙量	V_v	31.6 m^3	自由水+吸着水+空気
1リングあたりの掘削土中の有効間隙量	V_{v2}	19.6 m^3	自由水, 砂層の有効間隙率:30%
動水勾配	i	0.095	切羽前方10~30m間の平均動水勾配
透水係数	k	0.002 cm/s	$k=2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
想定排水境界面積	A	$5,027 \text{ m}^2$	半径20mの球の表面積
想定排水量(1リングあたり)	Q	34.4 m^3	半径20mの球の表面積での通過水量
掘削土中の自由水量と想定排水量との比		0.57	V_{v2}/Q

表 4-7 (2) 地山内の水の移動境界の大きさ

間隙水圧の計測値からの動水勾配の算定		備考	
切羽前方30m地点での間隙水圧	0.064 MPa	①	図4-35より
切羽前方10m地点での間隙水圧	0.083 MPa	②	図4-35より
水圧差②-①	0.019 MPa		
水頭差	190 cm	③	
動水勾配	0.095	④	$i=③/2000\text{cm}$
切羽を中心とする半径20mの球の表面積を平均的に通過する想定排水量(1リングあたり)の算出		備考	
想定排水境界面積: A	5,027 m ²		半径R=20mの球の表面積
透水係数: k	0.002 cm/s		$k=2.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$
想定排水量: $Q=kiA$	34.4 m ³ /リング	⑤	1リング掘削時間60分あたり流量
1リングあたりの掘削土中の自由水量の算出		備考	
シールド掘削断面積: A_s	43.6 m ²		シールド外径: $D_o=7.45 \text{ m}$
掘削土量: V	65.4 m ³ /リング		$V=1+e$ $V=A_s \cdot 1.5\text{m}$ (掘進長)
掘削土中の水量: V_w (=自由水+吸着水)	29.3 m ³ /リング		$V_w=S_r \cdot e/100$
掘削土中の間隙量: V_v	31.6 m ³ /リング		$V_v=n \cdot V/100$
掘削土中の有効間隙量: V_{v2} (=自由水量)	19.6 m ³ /リング	⑥	砂層の有効間隙率*) 30% $V_{v2}=V \times 30\%$
地山内の水の移動境界の大きさ		備考	
掘削土中の自由水量と球(R=20m)の表面積を通過する想定排水量との比(Q/V_{v2})	0.57		⑤/⑥

注1:*)水理公式集(1974)による

注2: 有効間隙量等の算出には下表の常磐道Tの土質試験結果**)の値を適用

湿潤密度 ρ_t	1.816 g/cm ³
乾燥密度 ρ_d	1.369 g/cm ³
土粒子の密度 ρ_s	2.649 g/cm ³
自然含水比 w	32.7 %
間隙比 e	0.936
飽和度 S_r	92.6 %
間隙率 $n=e/(1+e)*100$	48.3 %

注3:**)常新、伊奈・谷和原地区地質調査2, 試料番号S12-2による

この検討結果は、掘進中には、切羽に集まった余剰水が地山に排出され、それが地山の中に浸透していくことの一つの証拠と考えられるが、掘進中の地山間隙水圧の上昇が切羽における水の地山への排出によって発生していること、さらに、排出される水量による間隙水圧の変動状況については、第5章において、浸透流解析によるシミュレーションによって検証する。

さらに、地山に排出される土中水の量については、次のように考えられる。排出される土中水としては、まず、地山に含まれている自由水であり、次に、添加材の種類によっては発生することがある、泥土化に必要な添加材に含まれる余剰水があげられる。前者は地山の有効間隙率に相当する量であり、後者は添加材の種類や性状によって異なる量である。したがって、泥土が施工から経験する4.4.2で示した適切な性状を発揮するときの泥土の状態を図4-44のようなものと想定すれば、泥土化のための最少の添加材注入量は、栗原ら²⁹⁾が述べているように、地山の有効間隙率に相当する量となり、表4-7の結果から、その大部分が地山の間隙水であると見なすことができる。

この考え方に基くと、地山の有効間隙率相当量を超えて過剰に注入された添加材は、粘性が大きいので、ほとんど地山への浸入ができないため、泥土に地山の間隙率以上の間隙を作ってそこを埋め、添加材中に土粒子が浮かんた状態を作り出すことになる。このような状態では、良好な泥土の性質は発揮し得ず、泥土と添加材とが分離状態となり不透水性が崩れるとともに、泥土圧が低下すると地山からの水の浸入を防止する機能を発揮しにくい状態が生まれてくると考えられる。

(2) 地山間隙水圧

帯水性の砂質地盤における土圧式シールド掘進時に発生する地山の間隙水圧の上昇は、(1)で推論したように、シールドの推進力の作用に起因する泥土圧とビット圧による、主として、切羽での地山への、泥土化過程で発生した元々地山にあった土中水を中心とする余剰水の地山への排出に起因すると考えられ、その排出過程での切羽における間隙水圧の変動による非定常的な浸透圧の作用が原因となっているものと考えられる。

図4-62には、計測された掘進中と掘進停止中の地山間隙水圧と泥土圧の変化状態を示す。地山間隙水圧は、切羽が計測点の3m後方にあり、かつシールド断面外殻から1m離れでの測定結果である。これによれば、地山の間隙水圧は、掘進中に泥土圧の変動よりは鈍感に、しかしながら、泥土圧の上昇や変化に類似した変動を示す。また、図4-63に示すように、シールド機が測点に近づくにつれて、間隙水圧上昇量も増大する。この上昇のピークは、切羽前方5m前後の地点であり、切羽通過2m後方で一旦間隙水圧が低下し、その後また上昇している。このピーク発生位置や一旦低下位置は、間隙水圧測定位置がトンネル断面にないことが原因で発生していると考えられるものの、切羽からの土中水の排出方向と地山内の水の浸透方向、過剰間隙水圧散逸方向の影響を反映しているとともに、フィッシュテールなどによる地山掘削時に発生する地山の崩れや緩みの大きさなどの施工要素が

影響していると考えられる。ここで注目しておきたいのは、図4-63の破線で示したように、変動する地山間隙水圧の上限値の包絡線が、切羽ではほぼ泥土圧になることである。このことは泥土圧に等しい圧力を持った水が地山に排出されていることを示すもので、(1)のメカニズムの証拠とも考えられる。

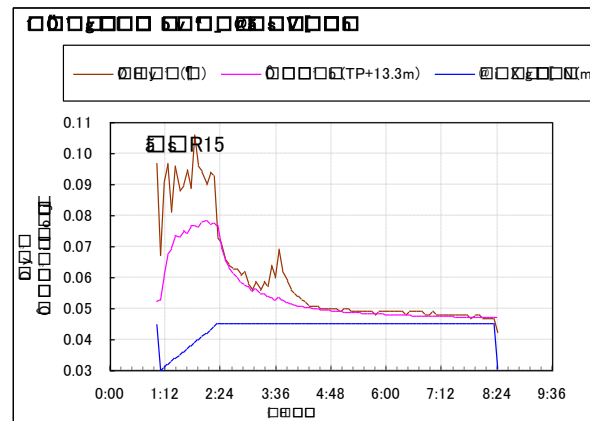


図4-62 掘進中と掘進停止中の地山間隙水圧と泥土圧の変動

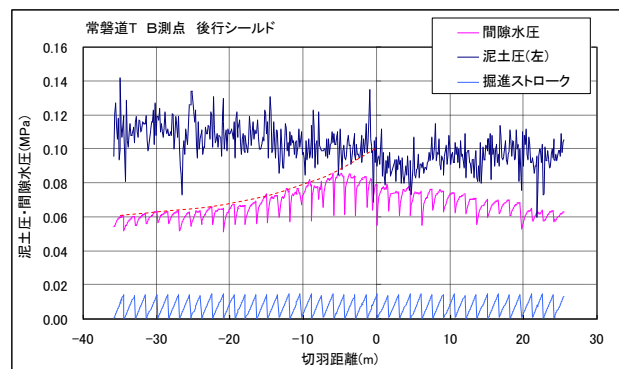


図4-63 地山間隙水圧の詳細な変動状況

一方、対象地山が軟弱粘土の場合には異なったメカニズムで地山の間隙水圧が発生するものと推定される。図4-64には、前述の阪神シールドにおける泥土圧と天端直上の位置に設置した地山間隙水圧計の挙動を示している。また、図4-65には、図4-64中の○部分を拡大して示している。切羽上部に設置した土圧計による泥土圧と絶対値は異なるものの、その間隙水圧の変動は、シールド側からの作用圧である泥土圧の変動とほぼ完全にリンクしていることがわかる。このことは、軟弱粘性土地盤では、泥土圧による余剰水の地山への浸透は考えにくいことから、その変動の主要因は帯水性砂質地盤の場合と同様、泥土圧であるものの、帯水性の砂質地盤におけるシールド掘進中の地山内の間隙水圧の上昇メカニズムとは異なったメカニズムで、その変動がシールド側から作用する圧力（全応力）の変化により直接生じていることを示しているものと考えられる。このことについては、第6章の切羽における応力バランスにおいて検討する。

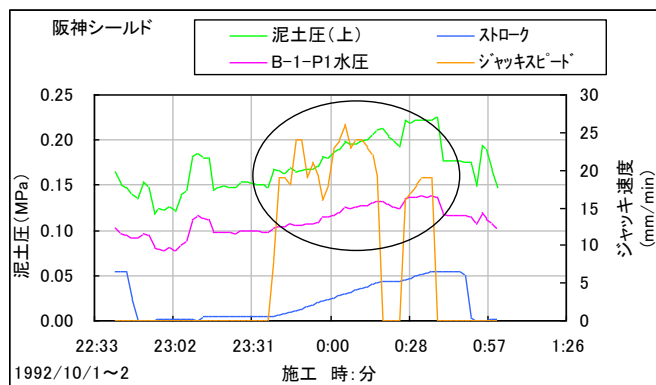
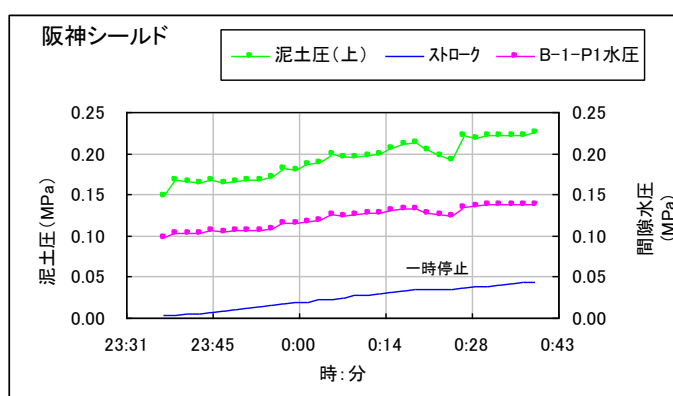
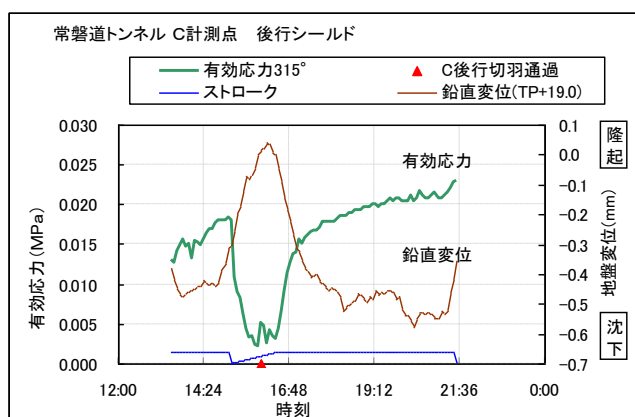


図 4-64 泥土圧と地山間隙水圧の変動（阪神シールド）

図 4-65 泥土圧と地山間隙水圧の変動（阪神シールド）
〔図 4-64 の拡大図〕

(3) 有効応力変化と地山変位

図 4-66 には、後行シールドが計測断面を通過する際に、先行シールドセグメントに設置した土水圧計と水圧計の変化から、土水圧計と水圧計の計測値の差を計算有効応力として、図 4-67 の地中沈下計と傾斜計から求めた地山の鉛直、水平変位を比較して示した。

図 4-66 (a) 有効応力変化と地盤鉛直変位との関係
(常磐道 T)

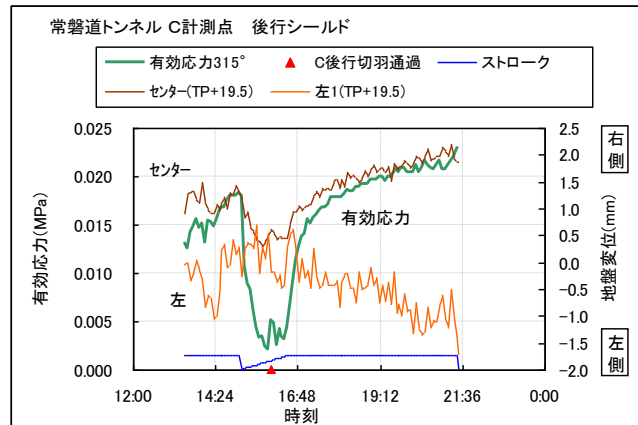


図 4-66 (b) 有効応力変化と地山水平変位との関係 (常磐道 T)

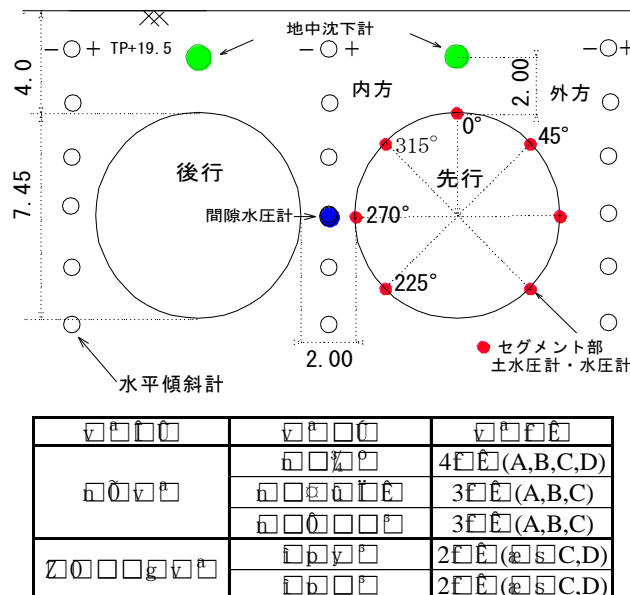


図 4-67 計測の種類と計測機器の配置 (常磐道 T)

これによれば、切羽前方地山の隆起・沈下の挙動は、その場所の間隙水圧変動と密接な関係を持っており、間隙水圧の上昇とともに地盤が隆起し、低下とともに沈下する性状を示す。このような傾向については、寺本ら²⁶⁾の平野川シールドにおける土圧式シールドの現場計測結果でも確認されており、このことは、地山の有効応力状態の変化を考えると、次のように説明できる。

地盤内の全応力は有効応力と間隙水圧の和で表される。4.3.2 でも述べたように、掘進時には、マシンからの作用力と泥土化余剰水の加圧排水により、地山の全応力と間隙水圧が変動することになる。この結果、相対的に地山の体積変化が鉛直上方向に膨張することにより、地山が隆起するものと考えられる。

一方、掘進停止時には、作用力の停止と泥土化余剰水の流入浸透作用の停止による過剰間隙水圧の消散に伴い、相対的に地山の体積変化が鉛直方向に縮小することにより、地山が沈下するものと考えられる。

なお、これらの状況に際して、図 4-66(a)に示すように、計算有効応力が減じる場合には隆起となり、増加する場合には沈下挙動を示しており、有効応力の変動と地山挙動は強い相関性を示していることが確認される。

このような有効応力の変化と地山の沈下の関係は、添加材として気泡を用いた軟弱粘性土地盤を掘削した阪神シールドでも計測されている。図 4-68 には、天端直上に設置された地山内土圧計と間隙水圧計を用いて、トンネル掘進方向の有効応力の変化を計算で求め、トンネル直上の地盤沈下と比較したものを示す。これによれば、計算上の有効応力が減少して地山が隆起すること、反対に、有効応力が増えると地山が沈下する傾向があることがわかる。一方、このときの泥土圧の変化と地盤沈下の変化を示すと図 4-69 のようになる。

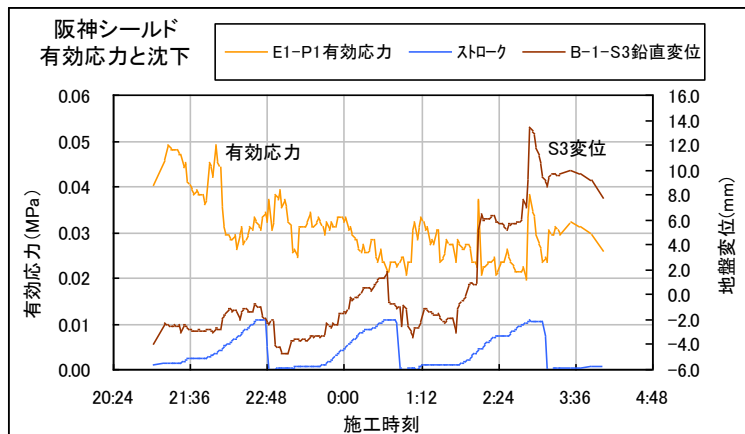


図 4-68 有効応力変化と地盤鉛直変位との関係（阪神シールド）

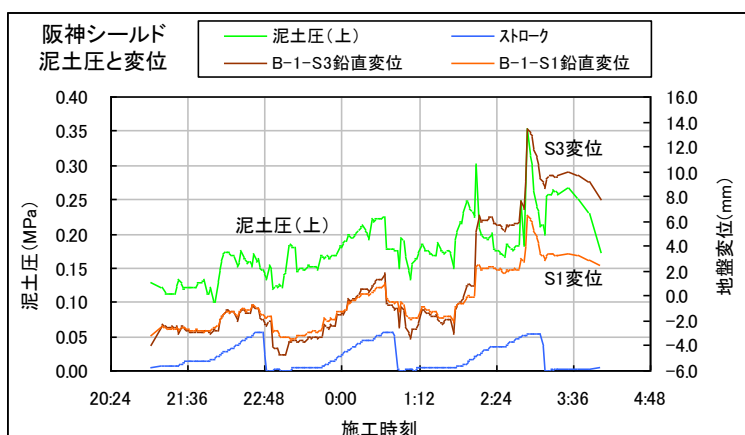


図 4-69 泥土圧と地盤鉛直変位との関係（阪神シールド）

地盤沈下は、泥土圧の変動とリンクしており、泥土圧が低下すると沈下が発生し、泥土圧が上昇すると、反対に、地盤が隆起している。このことは、地山間隙水圧の上昇と泥土圧の変化が図 4-65 に示した関係にあることを考慮すると、地山の間隙水圧の変動が、泥土圧変動と一致することから、地山間隙水圧、地山有効応力の変動、地盤沈下の関係が、泥土圧の変動を起因とするものと言えることがわかる。

このことは、間隙水圧と地山変位、また、全土圧の測定位置に若干の離れがあるものの、地山の間隙水圧と鉛直変位、セグメントの全土圧（土圧＋水圧）測定結果から、（セグメント全土圧－地山間隙水圧）を地山の計算有効応力として、その変動と地山鉛直変位との関係を示す、図 4-66 (a) から前述のとおり裏付けられる。また、図 4-66 (b) には、同様に有効応力変化と地山の水平挙動の関係を示しているが、掘進時にはセンターと左側の水平挙動に乱れが生じており、有効応力変動との相関性は顕著でないものの、停止時には、それぞれがシールド掘削断面の外方へ変位している状況が顕著に現れている。この要因として、図 4-66 (a) に示される鉛直方向の挙動は、有効応力の復元により沈下傾向を示しており、その挙動に連動して水平方向には地山が左右に変位し押し拵げられていることが推察される。

4.6.2 掘進停止に伴うシールドから地山への作用と地山挙動

(1) 地山への作用の変化

掘進停止時には、推進ジャッキは1セグメント幅分が伸びた位置でホールドされた状態になり、掘進した空間が維持される状態が作られる。また、掘進停止によりシールド機からそれまで地山に作用していた力が消失する。

この掘進停止による地山への作用力の消失を検討するにあたり、再度掘進中における地山への作用力を整理しておく。掘進中にマシン側から地山に対する作用の主たるものは下記のとおりである。

- ① 地山切削のためのカッタースラスト力（＝ビット圧力）
- ② 掘進による地山とマシンスキンプレートとの摩擦によるせん断力
- ③ 泥土圧力
- ④ カッターによる地山の切削力
- ⑤ 切削土のチャンバー内への取り込み量とチャンバー内泥土の排土量のアンバランス力
- ⑥ 添加材の注入圧力
- ⑦ 裏込め注入圧力
- ⑧ 掘削土の塑性流動化に伴う余剰水の地山への排出に伴う過剰間隙水圧
- ⑨ ジャッキ操作に伴うマシンのピッチング等の姿勢移動による作用力

一方、シールドの掘進停止により、上記各作用力の状態は変化するとともに、新たな作用が発生する。その状態を整理すると次のとおりとなる。

- | | |
|------------|---------------------------------------|
| 消滅する作用 | : 上記 ①②④⑤⑦⑧⑨ |
| 変化して作動する作用 | : 上記 ③⑥ (⑥は泥土圧保持操作の有無により作用する) |
| 新たに発生する作用 | : セグメント組み立てに伴うジャッキ力のバランス変化
(停止中の⑨) |

上記のうち、切羽における泥土圧力やビット圧力に比較して地山への影響が小さいと考えられる②地山とシールド機の摩擦、⑦裏込め注入圧、並びに泥土圧の変動として捉えることとする④切削力、⑨ピッチング等については、本論の検討の対象としては除外する。

したがって、掘進が停止した後も、マシン側から地山に作用する力は、泥土圧力、添加材注入圧力、セグメント組み立てジャッキ推力である。

掘進停止は、掘進の停止に伴い変動する作用力のうち、特に推進力により発生していた泥土圧の変動とビット圧の消失につながると考えられ、推進力の停止に伴う泥土圧とビット圧の変化がどのようなものかの分析が掘進停止の地山への作用を考える上で重要となる。

また、掘進停止に伴い停止される添加材注入圧の泥土圧に対する影響についても考慮す

る必要がある。

以上が、掘進停止に伴う、切羽面へのシールド機側からの作用力の変化となる。

ビット圧は完全に消失するものの、泥土圧は掘進停止で即座に消失することにはならず、**図 4-62** に示すように、一旦急激な圧力低下を生じるものの、その後、緩やかに低下していく。

(2) 泥土圧低下と地山間隙水圧低下のメカニズム

1) 泥土圧低下のメカニズム

掘進停止に伴い添加材を用いて作った泥土では、泥土圧は掘進停止後に**図 4-62** に示すような掘進停止直後に急激な泥土圧の低下を示し、その後時間経過に伴う緩やかな低下を示す。前述のように、掘進停止はシールドジャッキのストロークの維持が行われた状態でのシールド推進力の停止であり、ビット圧の消失であると同時に泥土への加圧の停止と言える。

泥土圧の急激な低下とその後の緩やかな低下の要因としては、次の4つの要因が推測される。

- ① チャンバー内の容積変化
- ② 添加材からの水の分離・脱水
- ③ 泥土から地山への水の移動
- ④ 泥土そのものが有する組成構造の変化
- ⑤ 泥土が地山から受ける圧力の変化に連動した低下

- ① チャンバーの容積変化については、掘進停止直後はジャッキを張った状態が基本であるが、その掘進停止の処置状況によっては生じる可能性があるものの、**図 4-70** のようにその影響を発生させない施工も行えると考えられる。
- ② 添加材からの水の分離については、塑性流動化が確保された良質な泥土状態では、掘削土の間隙を埋める添加材中の水は自由水ではないことから、攪拌による混練等の状態変化やマシンの推進がない停止状態においては、泥土中の添加材からの水の分離は発生しないものと考えられ、添加材中の水が地山方に排出移動することはない。さらに、泥土は乾燥状態や周辺にサクションが作用する状態が発生する環境にないことから排水が発生するとは考えられない。
- ③ チャンバー内の泥土から地山への水の移動の可能性については、**表 4-8** に示す添加材との混練により作った泥土の加圧脱水試験結果によると皆無とは言えないものの、掘進停止に伴い外力により加圧状態が解除され、推進が行われない状況では、地山への排水が継続される状態が発生しないと考えられる。また、地山性状にあった添加材が用いられていることを基本とすれば、掘進停止後の泥土圧変化の要因からは除外して考える。

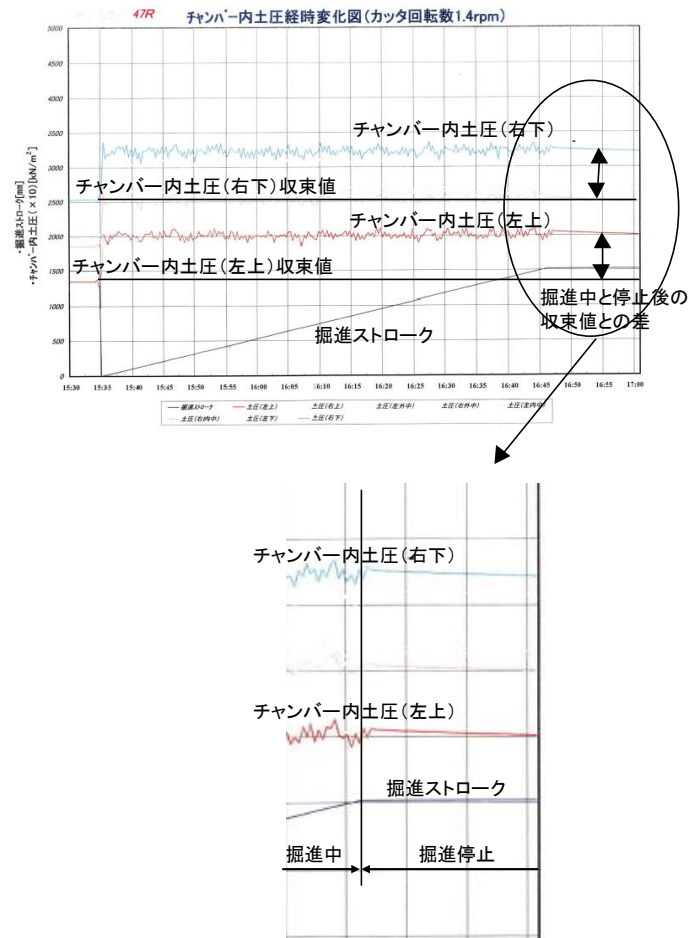


図 4-70 飽和軟弱粘性土を攪拌・混合して作った泥土の掘進停止後の泥土圧変化

表 4-8 泥土の加圧脱水試験（瀬古トンネル）¹⁰⁾

試料番号	粘 度		スランプ		ブリージング率						加圧脱水量		透水係数 k		総合評価	
	測定値 (cps)	評 価	測定値	評 価	測定値 (%)						測定値 (cc)	評 価	測定値 (cm/sec)	評 価		
					1H	2H	3H	5H	12H	24H						
3	1300	選定範囲 ○	15	選定範囲 ○	0	0	0	0	0	0	中でも極めて良好 ◎	14	選定範囲 ○	$k=7.15 \times 10^{-7}$	選定範囲 ○	○
4	1300	選定範囲 ○	17	選定範囲 ○	0	0	0	0	0	0	中でも極めて良好 ◎	12	選定範囲 ○	-	試料3より判断 ○	○
7	2600	選定範囲 ○	15	選定範囲 ○	0	0	0	0	0	0	中でも極めて良好 ◎	10	中でも極めて良好 ◎	$k=7.51 \times 10^{-7}$	選定範囲 ○	○
8	2600	選定範囲 ○	18	選定範囲 ○	0	0	0	0	0	0	中でも極めて良好 ◎	9	中でも極めて良好 ◎	$k=1.84 \times 10^{-7}$	中でも極めて良好 ◎	◎
11	3200	選定範囲外 △	14	選定範囲 ○	0	0	0	0	0	0	中でも極めて良好 ◎	10	中でも極めて良好 ◎	$k=6.41 \times 10^{-7}$	選定範囲 ○	△
12	3200	選定範囲外 △	19	選定範囲 ○	0	0	0	0	0	0	中でも極めて良好 ◎	9	中でも極めて良好 ◎	-	試料11より判定 ○	△
14	1500	選定範囲 ○	19	選定範囲 ○	0	0	0	0	1.0	2.8	概ね選定範囲 △	16	選定範囲 ○	-	-	△
19	1000	選定範囲 ○	15	選定範囲 ○	0	0	0	0	0	0	中でも極めて良好 ◎	10	中でも極めて良好 ◎	$k=1.51 \times 10^{-7}$	中でも極めて良好 ◎	◎
選定基準	1000~3000 cps		13~20		ブリージング率 2~3%以下。 ただし、ブリージング率が0% は極めて良好と評価する。						加圧脱水量 20cc以下。10 cc程度のは極めて良好 と評価する。		透水係数 $k=10^{-6}$ cm/sec以下。 ただし、 $k=1.0 \times 10^{-7}$ cm/sec程 度以下のものは極めて良好と評価		◎の方が多い→◎ ○の方が多い→○ 1つでも△ →△	

- ④ 推進力の停止に伴う泥土そのものが有する組成構造の変化（泥土自体の物理特性）に起因して、圧力が低下している可能性については、泥土の外部に対する圧力伝搬と外力に対する反応という点から土圧式シールドの重要な点と考えられることから、前述のように、その詳細については別途、第5章で検討する。
- ⑤ 掘進の停止により泥土が地山から受ける圧力の変化に連動した低下については、泥土圧が緩やかに低下する経時変化は、掘進に伴い地山に発生した過剰間隙水圧が浸透消散することにより低下する、間隙水圧の経時変化と酷似していることから、低下曲線形態から判断すると、掘進停止に伴う泥土圧の低下が地山側からの「間隙水圧（状況により水平土圧も加わる）による受働圧力」とのバランスにより生じていると考えることがより合理的と考えられる。この合理性の検証は、第5章で、瀬古T上飯田工区と常磐道Tにおける泥土圧低下曲線と地山間隙水圧低下曲線の相違をもとに検討する。

一方、掘進停止前後のシールド側からの地山への作用の変化に伴い地山側に生じる応力変化に着目する。シールドの掘進中の地山側への作用力により、地山においては次の変化が生じ、これに伴い地山からマシンに対する反作用力が働くことになる。掘進に伴い刻々変化する動的な作用力と反作用力のつりあいを保ちながら、マシンが前進することになる。

- ① 掘進中の地山内での変化
- a) 泥土圧・ビット圧（・添加材注入圧）による全応力の変動
 - b) 強制的な排水の流入による過剰間隙水圧の発生
 - c) 過剰間隙水圧による非定常的浸透流の発生
 - d) 地盤変位の発生
- ② 掘進中の地山からマシンへの反作用力
- a) 掘削切羽における水平方向土圧（静止土圧または主働土圧）
 - b) 間隙水圧（静水圧 + 過剰間隙水圧）
 - c) マシン外殻に対する摩擦抵抗力
 - d) マシン外殻に対する鉛直方向土圧（全土被りまたは緩み土被り）

なお、d)については、必ずしも「掘進による反作用力」の範疇に入るものではないが、ここにおいては、上記のとおり分類することとする。

この掘進状態から停止に移行すると、(1)に述べたとおり、マシン側からの作用力が変化することになり、地山からの各反作用力に変化が生じることになる。

掘進停止により、シールド側からはビット圧も添加材注入圧も瞬時にゼロとなり、泥土圧のみが作用することになる。

停止中に添加材注入を行うことは、泥土圧の低下を人為的に抑止しようとする操作であり、この場合には「泥土圧の変化は、泥土自体の構造特性や応力バランスによる必然的低下と圧力保持行為が合わさった泥土圧の変動」と捉えることとなる。

2) 地山間隙水圧の変動のメカニズム

掘進停止に伴うビット圧と添加材注入圧の作用停止によりシールド側からの地山への作用圧が減少し、掘進中に生じていた泥土圧とビット圧による余剰水の地山への排出が停止することにより、以後は地山内の間隙水圧の上昇要因が無くなること、さらに泥土圧も急激に低下することで図4-62のように、地山内の間隙水圧が低下する。これが、掘進停止直後に地山内間隙水圧が急激に低下するメカニズムであると考えられる。

掘進により余剰水の強制排出が行われ、地山に過剰間隙水圧が生じるが、掘進停止により余剰水の排出も瞬時に停止する。

したがって、掘進中には、強制排水により生じた過剰間隙水圧により、地山の静水圧・境界距離・透水係数・貯留係数等の地盤条件に応じた浸透流が発生して、この浸透流量と余剰水の排出量がバランスする過剰間隙水圧状態を継続していたことになるが、掘進停止以降は、余剰水の排出が停止することから、徐々に過剰間隙水圧は低下することになり、その後、静水圧に漸近することによりその消散が完了することになる。

すなわち、掘進停止に伴い、まず強制排水を地山に浸透させる圧力に相当する水圧の急激な低下が発生し、その後、時間経過とともに、残余の過剰間隙水圧が、浸透により漸減する低下が生じて、ほとんどの場合は静水圧に漸近することになる。

シールドの掘進と停止の繰り返しに伴う過剰間隙水圧の発生と低下については、第5章においてシールドマシンからの「余剰水の強制排出」を条件とした三次元浸透流解析により検証するが、地山間隙水圧の急激な低下のメカニズムについて再度整理すると下記のとおりである。

透水係数が大きく、浸透性が高い地盤においては、地山に強制的に排水（注水）しても、その浸透性により、過剰間隙水圧はほとんど発生しない。しかしながら、強制排水量が浸透量を上回る場合には、徐々に過剰間隙水圧が増加し、シールド掘進における強制排水量は、泥土圧、ビット圧の値により、上限があることから、排出と浸透の量が概ねバランスする状態に達する以降が「定常掘進状態」と解釈できる。したがって、掘進停止により強制排出が瞬時に停止することから、「強制排出相当分」が急激な低下となり、その後の過剰間隙水圧分が、漸減するものと考えられる。

次に、掘進停止中のシールド側からの作用力と地山の反応について考察する。

図4-71(a)には掘進停止中にセグメントの組立てを行ったときの推進力の変化と泥土圧の関係、図4-71(b)にはそのときの地山間隙水圧、添加材注入圧、さらに図4-71(c)には同じくそのときの添加材注入量と切羽土圧、地山間隙水圧の関係を示している。

これによれば、3つの添加材注入系統のうち第3系統により、少量の添加材を注入して泥土圧を維持しようとしている中で、セグメント組立のために、ジャッキの抜き差しを行っており、その作用が影響している状況がわかる。

また、このジャッキ力の変動による泥土圧の変化の関係を評価しようとする図4-71(a)においては、ジャッキ力の変動と泥土圧の変化は、必ずしも相関性は強くない状況を示し

ている。図4-71(b)によれば、3系統からの添加材注入圧力と切羽土圧の変動の相関性が強いことが確認される。

なお、図4-71(c)に示されている添加材1, 2系の注入量は誤差範囲であり、3系のみが作動していることと、その変動に応じた泥土圧の変化の状況が確認できる。

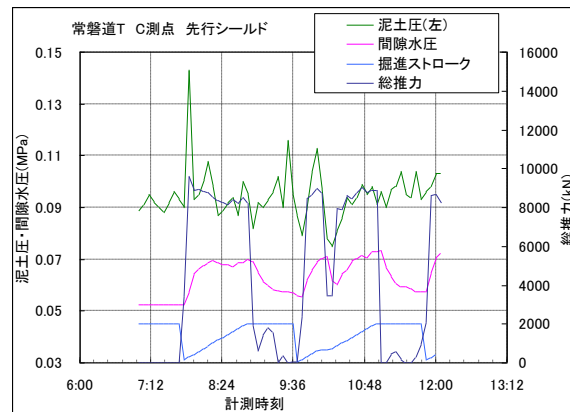


図4-71(a) セグメント組立時の推進力と泥土圧の変化

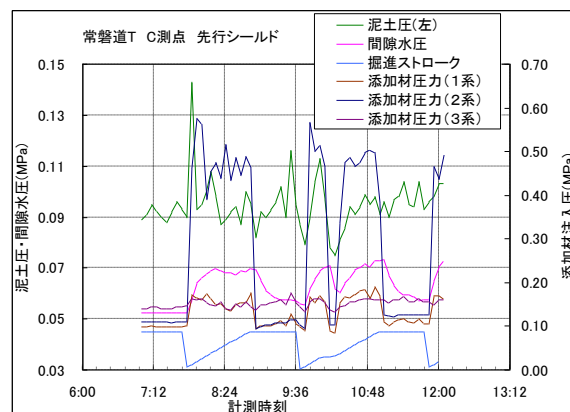


図4-71(b) セグメント組立時の添加材注入圧と泥土圧、地山間隙水圧の関係

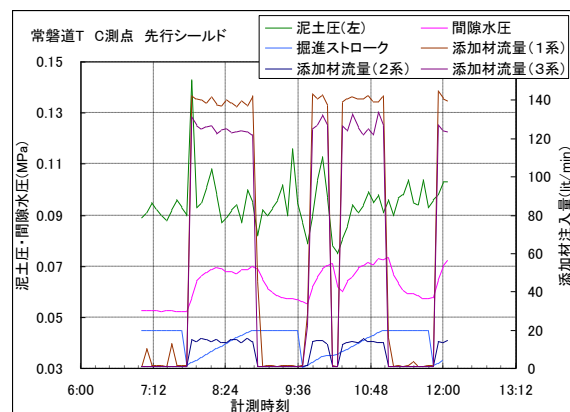


図4-71(c) セグメント組立時の添加材注入量と泥土圧、地山間隙水圧の関係

以上のことから、セグメント組立作業時の推進ジャッキ圧の作用は、推進を伴わないマシンの姿勢変化であり、これに伴う泥土圧の変化は皆無ではないが、相関性はほぼ無く、コントロールできるものではない。一方、少量なりとも一定量の添加材注入が行われている状況では、添加材注入量は、泥土圧の変化に影響を及ぼすことが確認される。さらにこの作用は、地山内の間隙水圧の掘進停止に伴う低下にも若干影響を及ぼし、その低下を遅らせる傾向があることも3つの図からわかる。

(3) 地山変位発生メカニズム

掘進停止に伴う推進力と添加材注入圧の消失は、泥土圧の低下と地山間隙水圧の低下を引き起こすことはすでに示したとおりである。

したがって、掘進中の地山の隆起・沈下のメカニズム同様、地山間隙水圧の変動に伴って、地山中に応力状態の変化が生じることにより、地山が変位することになる。

図 4-72 には、掘進中および掘進停止中の泥土圧、地山間隙水圧および地盤沈下の変化を示す。

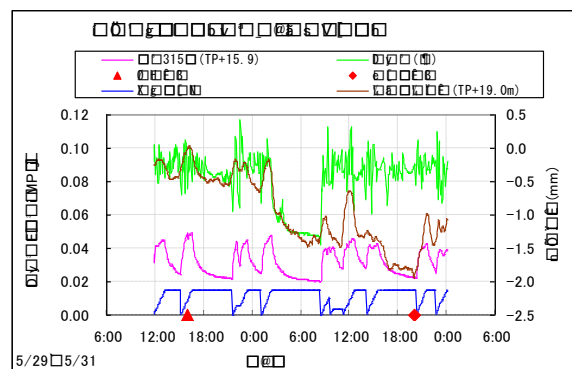


図 4-72 泥土圧、間隙水圧およびシールド直上地盤変位の変化

これによれば、地盤の変位は、掘進中に隆起した分は、掘進の停止に伴い急激にほぼ掘進前の状態まで沈下すると共に、過剰間隙水圧が浸透消散するのに連動して、さらに低下していることがわかる。

次に、先行シールドセグメント背面で計測した土圧と水圧から求めた計算有効応力と鉛直・水平両方向の地盤変位の関係について図 4-73 から図 4-76 に再掲する。地盤変位の計測位置と土水圧の計測位置には鉛直および水平方向の位置の差異があるものの、掘進中の地山変位でも示したように有効応力変化の変動と地盤変位について、連動性が確認できる。なお、水平方向変位は、(－) がシールド断面方向への変位である。

さらに、図 4-77 には、掘進停止後の地盤鉛直変位と地山間隙水圧の測定例を示す。また図 4-78 には、その間におけるジャッキ操作の有無を示す。

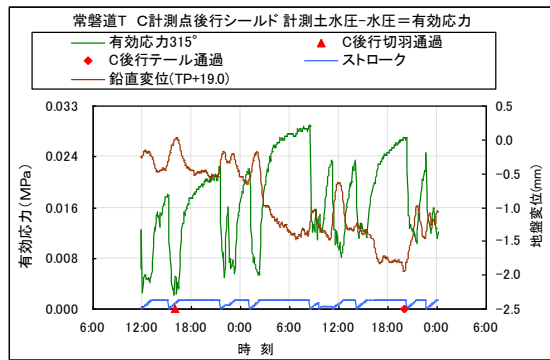


図 4-73 地盤鉛直変位

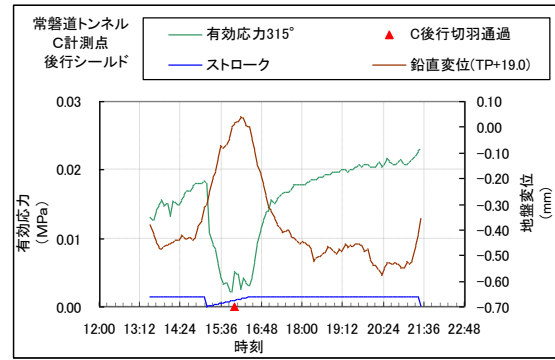


図 4-74 地盤鉛直変位（切羽通過時）

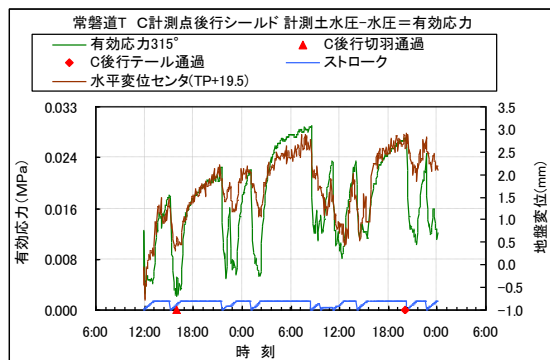


図 4-75 地盤水平変位

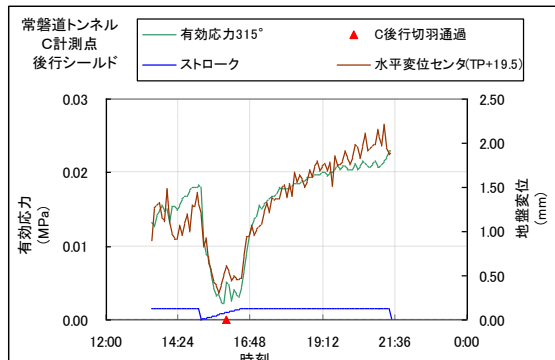


図 4-76 地盤水平変位（切羽通過時）

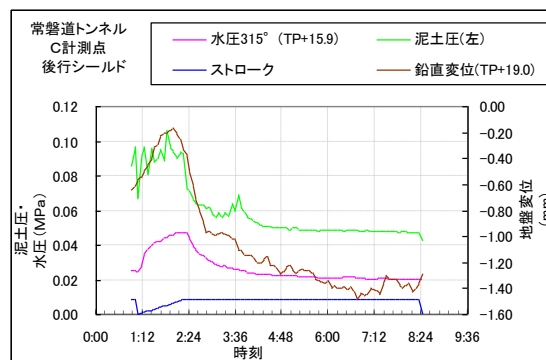


図 4-77 地盤鉛直変位と間隙水圧・泥土圧変動

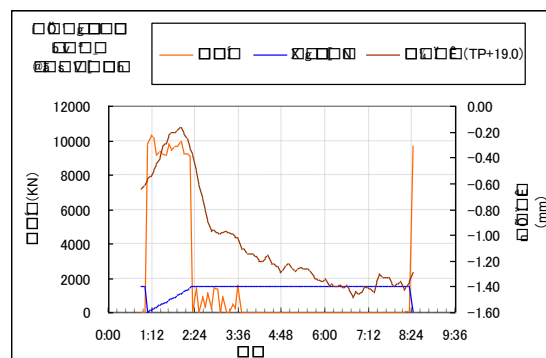


図 4-78 地盤鉛直変位とジャッキ操作

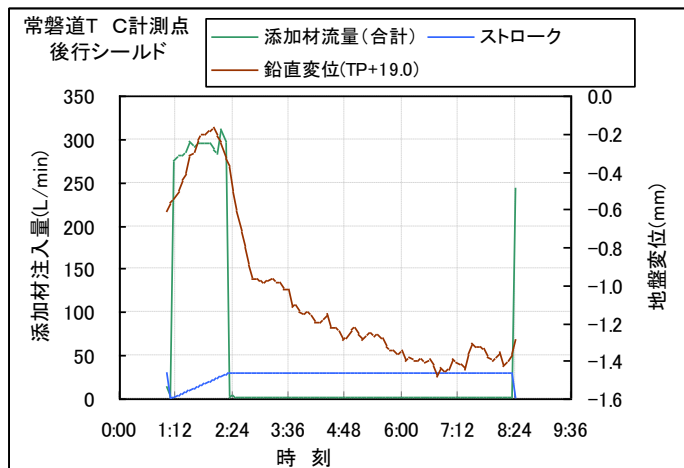


図 4-79 地盤鉛直変位と添加材注入

これによると、掘進停止直後に急激な沈下が生じており、この間における泥土圧の急激な低下との連動が見られる。しかしながら、間隙水圧の低下の傾向とは連動性が小さい状況を示している。通常は、後述するように間隙水圧とも一定の連動を示しているが、このケースにおいては、図 4-78 に示すように、掘進停止直後からセグメント組み立てのためのジャッキ操作が行われており、また、図 4-79 に示すとおり圧力保持のための添加材注入は行われていないことから、作用力はジャッキ操作のみであり、それらの影響による地盤の急激な沈下が発生したものと考えられる。さらに停止の継続により沈下が継続しているが、地山の間隙水圧がほぼ低下しきった段階になっても、泥土圧の低下が緩慢に継続しており、それに連動して地盤の沈下は継続するように見える。

このような掘進停止中の間隙水圧・泥土圧の変動と地山の変位のメカニズムは、掘進時の地山挙動のメカニズムと同様に有効応力の変化に伴い発生しているものと考えられる。なお、地山挙動の計測点については、間隙水圧は先行セグメントの背面、地山変位は後行シールド直上のものを表示しており、計測位置が異なっていること、掘進停止中に作用する添加材注入圧や推進力は掘進中のそれよりも小さいが、その作用力の影響が緩慢に地山に伝播していることが関係しているとも考えられる。この点に関しては、更なる細密な計測と分析が必要と考えられる。

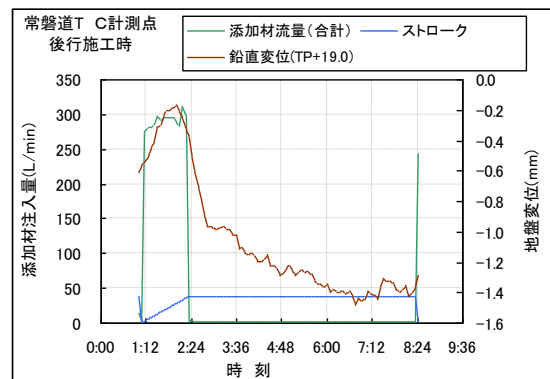


図 4-79 地盤鉛直変位と添加材注入

これによると、掘進停止直後に急激な沈下が生じており、この間における泥土圧の急激な低下との連動が見られる。しかしながら、間隙水圧の低下の傾向とは連動性が小さい状況を示している。通常は、後述するように間隙水圧とも一定の連動を示しているが、このケースにおいては、図 4-78 に示すように、掘進停止直後からセグメント組み立てのためのジャッキ操作が行われており、また、図 4-79 に示すとおり圧力保持のための添加材注入は行われていないことから、作用力はジャッキ操作のみであり、それらの影響による地盤の急激な沈下が発生したものと考えられる。さらに停止の継続により沈下が継続しているが、地山の間隙水圧がほぼ低下しきった段階になっても、泥土圧の低下が緩慢に継続しており、それに連動して地盤の沈下は継続するよう見える。

このような掘進停止中の間隙水圧・泥土圧の変動と地山の変位のメカニズムは、掘進時の地山挙動のメカニズムと同様に有効応力の変化に伴い発生しているものと考えられる。なお、地山挙動の計測点については、間隙水圧は先行セグメントの背面、地山変位は後行シールド直上のものを表示しており、計測位置が異なっていること、掘進停止中に作用する添加材注入圧や推進力は掘進中のそれよりも小さいが、その作用力の影響が緩慢に地山に伝播していることが関係しているとも考えられる。この点に関しては、更なる細密な計測と分析が必要と考えられる。

4.6.3 掘進停止中の作用力と地山挙動

(1) 推進力作用による泥土圧および地山間隙水圧変動とそのメカニズム

一般に、掘進停止中にはセグメントの組立が行われ、ホールドされているジャッキ推進ジャッキの一部が解除されてセグメントがセットされた後、再度ジャッキを張り直した状態でホールドされる。この過程で、セグメント面とのジャッキの当たりを取るときにジャッキ推力が作用することになる。その作用は、図4-71(a)のように小さい値である。

このセグメント組立時のジャッキ推力の作用は、直接チャンバー容積の変動を発生させる可能性があり、それによってチャンバー内泥土圧が変化することになる。

実際の施工管理においても、このようなジャッキ推力の作用による泥土圧上昇の効果を利用して、チャンバー内の泥土圧の低下を防止する目的でジャッキ推力を作用させることも稀に行われる。

その作用は、測定例によれば、図4-80に示すようにセグメントの組立に伴うもので断続的であり、その大きさは掘進中の総推力値の約20～30%程度の繰り返しである。

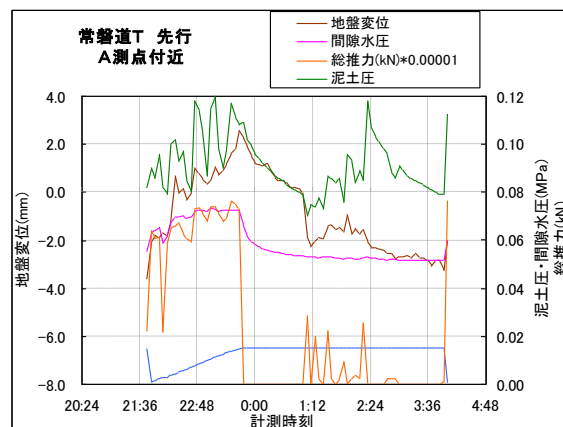


図4-80 掘進停止中の推進力作用に伴う地山間隙水圧、地盤鉛直変位および泥土圧の変化

この場合のジャッキ推力作用によるチャンバー内泥土圧の変動は、図4-71や図4-80からわかるように、掘進停止中の泥土圧の低下を止める程度に小さい場合や、掘進中と同程度まで上昇する場合など、一概に泥土圧の変動量とジャッキ推力の関係を論じることではできないが、これには、掘進中における泥土の状態やチャンバー内での充填度合いなどが影響しているものと考えられるが、敏感に反応することは確実である。

以下では、このようなジャッキ推力の作用が、切羽地山とチャンバー内泥土に及ぼす作用について分析を行い、その変動のメカニズムについて考察する。

1) ジャッキ操作による地山への作用

停止中の泥土圧の低下を抑止することにより、地盤変位を抑止する効果とそのために必

要なジャッキ推力の大きさに関して、具体的な報告は見当たらない。ここでは、掘進停止状態において、セグメント組み立て中に行われるジャッキ操作により、泥土圧・間隙水圧・地盤変位等の変動が生じていることから、その計測事例を分析することにより、ジャッキ操作による泥土圧や地山挙動への作用力の影響の程度についての推定を試みる。

図4-81には、7つのリングに亘る掘進と停止による泥土圧と地山間隙水圧の変動を示す。このデータ範囲において、掘進停止が約6時間に及ぶ長時間の掘進停止状態が記録されており、その状態における間隙水圧等の変動に着目する。なお、隔壁部における泥土圧力の計測位置は、図4-82に示すとおりである。

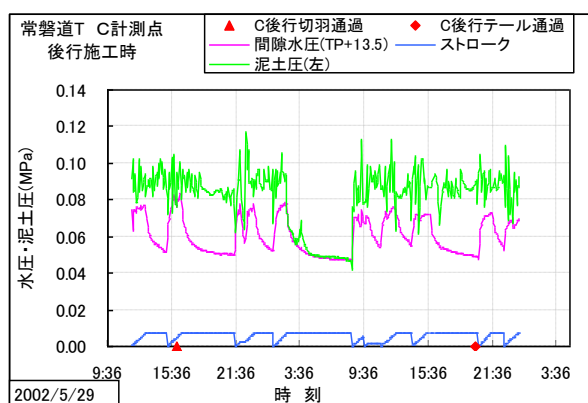


図 4-81 泥土圧と間隙水圧の変動

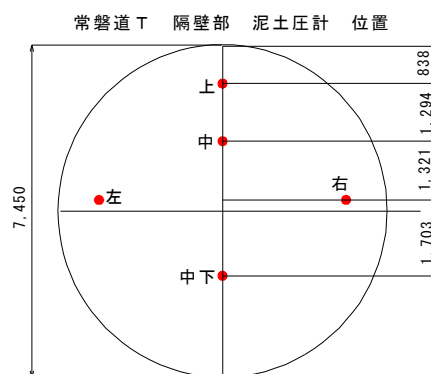


図 4-82 隔壁部の泥土圧計位置

図4-83には、掘進停止中のセグメント組み立て作業に関わるジャッキの張替えによるジャッキ推力の変動が記録されている。

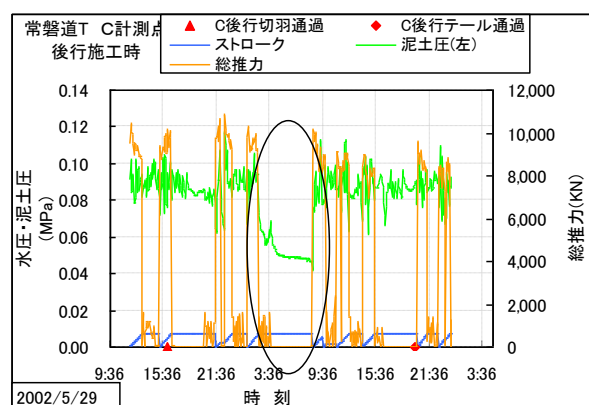


図 4-83 泥土圧と総推力の変動

図4-84および図4-85には、停止時に添加材の注入による泥土圧力保持が行われていない場合の施工状態を抽出して、泥土圧・間隙水圧・ジャッキ推力の変動を示す。

図4-86には、SL付近における泥土圧を平均値として、掘削断面積を乗じた全泥土圧力を示す。

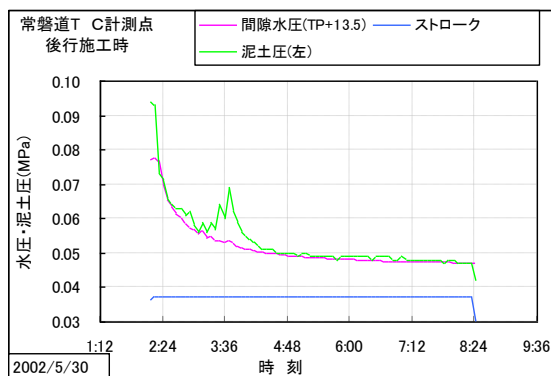


図 4-84 停止時の泥土圧と間隙水圧の変動

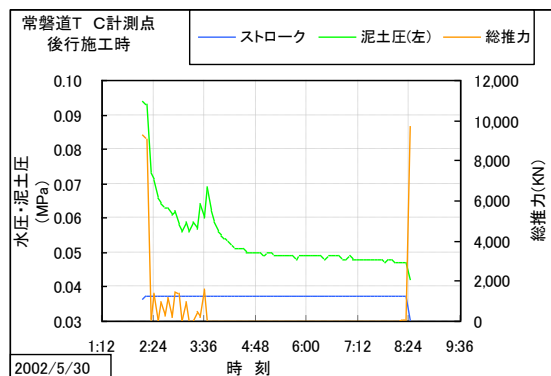


図 4-85 停止時の泥土圧と総推力の変動

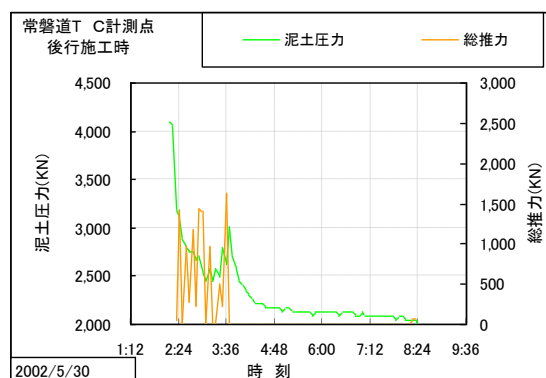


図 4-86 全泥土圧力と総推力の変動

これによると、ジャッキ推力の変動は、概ね 1,300kN 程度であるが、この操作により、停止直後の 4,200kN から 2,500kN まで漸減していた泥土圧力は低下が止まり、約 3,000kN に回復している。

ジャッキ操作が止まると、泥土圧は急激に低下した後に、再び減少を開始するが、その傾向は、ジャッキ操作がなされなかった状態における漸減傾向とほぼ近似した曲線を描いて低下していることがわかる。

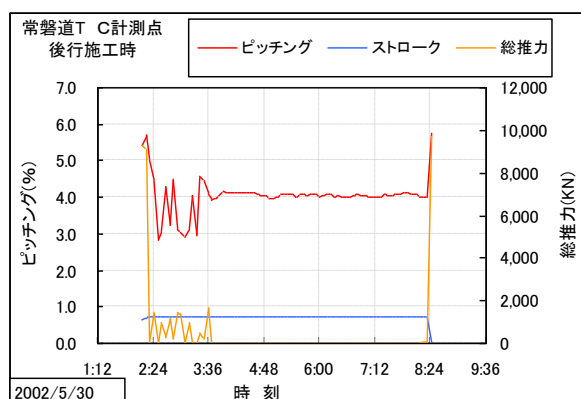


図 4-87 推力の作用とピッチングの関連

参考として図 4-87 には停止中のジャッキ操作によるマシンの姿勢の動きの指標としてピッチングとの照合を示す。

マシンの推進は行われないが、ピッチングに対する影響は敏感なものがあり、セグメントを順次組み立てることによる部分的なジャッキ操作によるマシン姿勢の変動に伴って泥土圧が変動していることが明らかであり、管理に際しては注意を要する。

図 4-88 にはジャッキ操作が行われている時間帯における間隙水圧の変動を、図 4-89 には停止から次のリングの再掘進までの間のシールド直上の地盤鉛直変位との関連を示す。

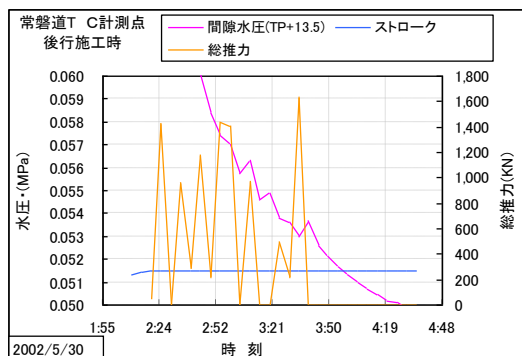


図 4-88 推力の作用と間隙水圧の変動

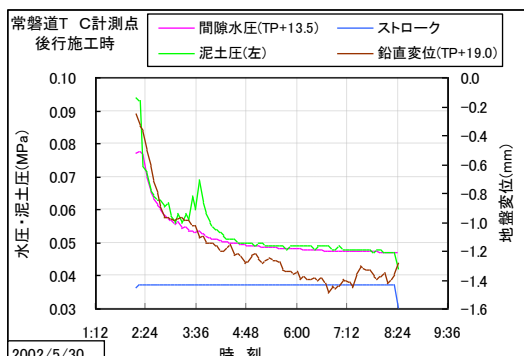


図 4-89 泥土圧と間隙水圧の低下連動

間隙水圧は、極めて些少な変動しか生じないことがわかる。すなわち、ジャッキ推力が通常掘進時の 20%程度でも掘進中の間隙水圧上昇のメカニズムにより、この状態で「掘進」がなされる場合には、それに応じた間隙水圧の変動が起こることになると推定されるが、停止状態でのジャッキの操作による間隙水圧の変動はほぼ生じないことがわかる。

また、前述の直上鉛直変位（沈下）については、図 4-90 に経時変化の詳細を示すとおり、ジャッキ操作により泥土圧が変動している時間においては、沈下傾向に乱れが生じると共に、沈下が抑止されている状況も判読される。この作用については再度後述するが、この現象は、ジャッキ力の作用により、地山に全応力変化を生じさせていることが推定されるとともに、間隙水圧の変動がほぼ生じないことから、地山を鉛直上向きに変位するような有効応力を作用させる力を与えていることが確認できる。

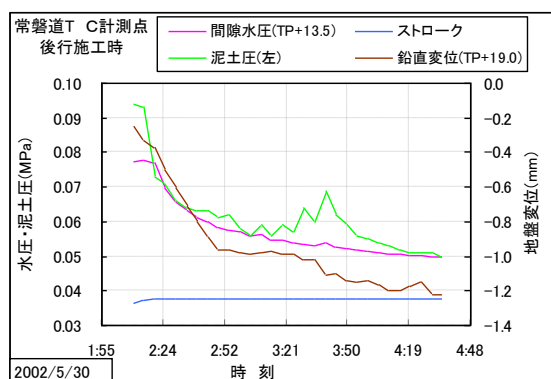


図 4-90 地盤鉛直変位の抑止影響

2) ジャッキ操作による泥土圧への作用

ジャッキ操作がチャンバー内泥土圧に与える影響について分析する。

図 4-91 は、掘進時には 3 秒、掘進停止時には 1 分間隔のデータを記録した施工事例である。

このデータに基づき、掘進開始から掘進停止において、ジャッキの操作により、チャンバー内泥土圧の変動を評価することにより、掘進時と停止時の操作による作用の影響の差異を検出すると共に、停止時におけるジャッキ操作による泥土圧への作用力とその活用のは是非について検討する。

まず、図 4-92 に掘進開始時のジャッキ推力と泥土圧の変動について示す。

掘進開始後、約 5 分間のデータであり、掘進が開始されて、前リング掘進後の停止状態により、低下した泥土圧を所定の泥土圧に上昇させるための遷移状態にある。この記録によると、泥土圧が所定の値に上昇する過程においては、ジャッキ推力と泥土圧との変動は極めて強い相関性を有していることがわかる。

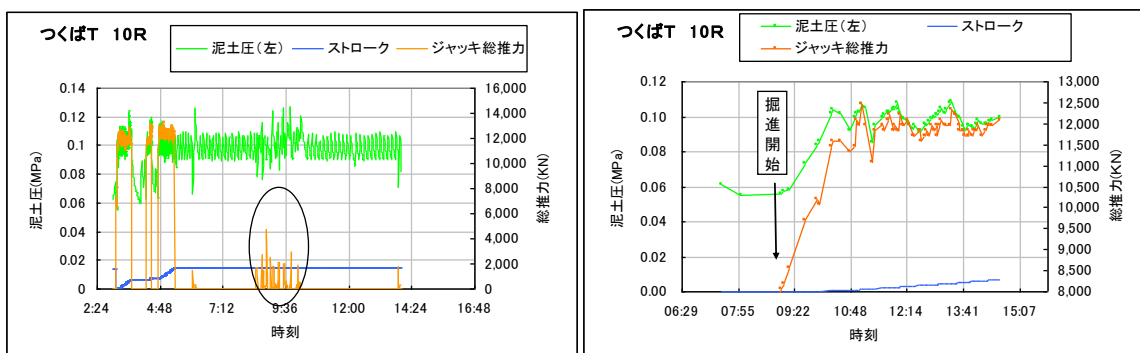


図 4-91 停止中のジャッキ操作

図 4-92 掘進開始時のジャッキ推力と泥土圧

次に、掘進停止時の影響について分析する。図 4-93 には、1 リング分の掘進が終了した後の停止中の状況を示す。泥土圧の低下を抑止するために、添加材の注入が行われていることから、泥土圧の変動はジャッキ操作の影響のみを示すものではないが、図 4-94 には、添加材の注入とジャッキ操作が行われた場合の泥土圧の変動を示し、図 4-95、4-96 には、同じ停止期間中において、ジャッキ操作は無く、添加材注入のみがなされた場合における泥土圧の変動を示している。

これにより、泥土圧の変動の程度(最大変動幅)を比較してみると、図 4-94 では 0.04MPa、図 4-95 では 0.02MPa 程度となっており、概ね 0.1MPa の泥土圧に対して約 0.02MPa (0.04 - 0.02MPa) の変動を与えていることがわかる。すなわち、これにより、セグメント組み立て時のジャッキ圧力は、掘進時の概ね 20% 程度である場合の泥土圧への影響の程度が推測される。掘進を伴わない状態であることを勘案すると、当然の帰結であるが、泥土圧維持のみを目的として、添加材の注入による場合には、材料費が必要となるが、ジャッキ推力による方法も効果的な手法であると考えられる。

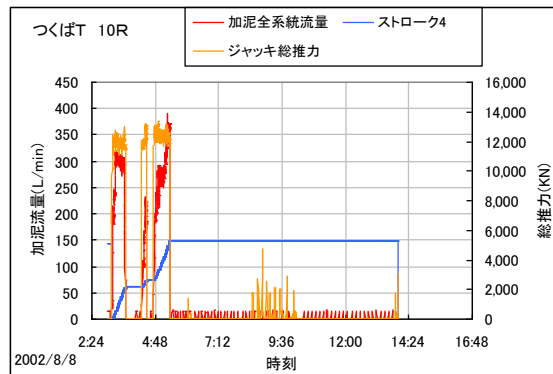


図 4-93 添加材注入量とジャッキ推力

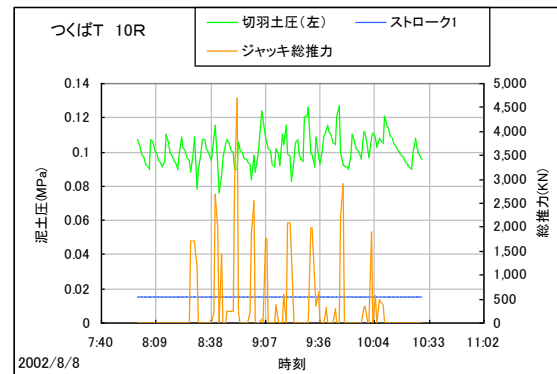


図 4-94 ジャッキ推力の影響

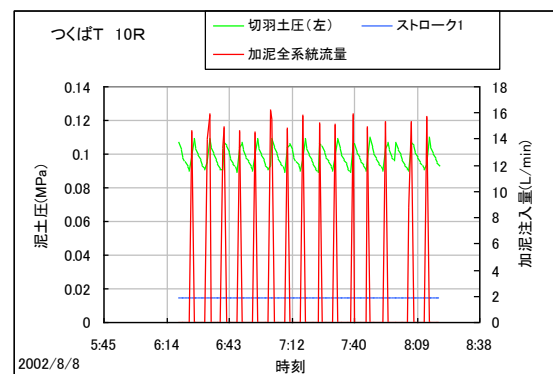


図 4-95 添加材注入量の影響

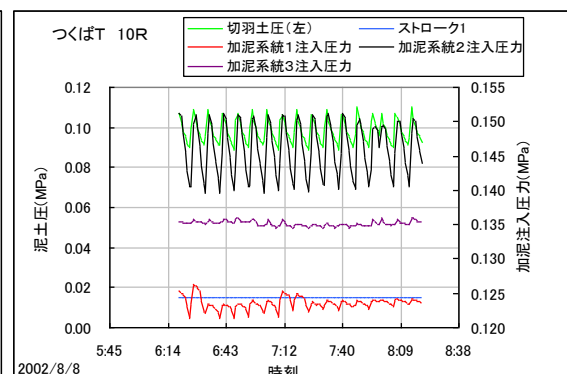


図 4-96 添加材注入圧の影響

なお、添加材注入による泥土圧の変動は、注入量と圧力に比例するものと考えられるが、図 4-95、図 4-96 による限りにおいては、泥土圧の変動は添加材注入圧との相関性は強いものの、泥土圧維持には、注入量により泥土圧を掘進時とほぼ同様に保つ値を上限として制御管理されており、注入圧は必然的についてくる値である。

ここで、図 4-96 において、実際に注入がなされているのは、第 3 系統によるものであり、他の系統の圧力は、受動的圧力が計測されているものである。

(2) 添加材注入による泥土圧および地山間隙水圧変動とそのメカニズム

掘進停止中に注入される添加材は、掘進中に注入される添加材と同様、既に述べたように水よりも粘性が高く、若干密度も大きい流体またはゾル状態で、この性状は、地山への浸透性は小さいものが多い。

掘進中の添加材の注入は、フィッシュテールやカッタースポークから行われるが、掘進停止中に行われる添加材注入は、泥土圧の低下を抑止する目的で実施されることから、その注入がバルクヘッドに設置した隔壁部上半に設けた注入孔から行われるのが一般的である。

図 4-97 に実際のマシンにおいて設置されている注入孔の位置を示す。停止中には、フィッシュテールやカッタースポークによる泥土と添加材の攪拌混合が行われないため、添

加材は、比較的高い粘性を持った流体として、所要の泥土圧を確保するために、図 4-96 のように泥土圧の約 1.5 倍程度の圧力を必要とする。

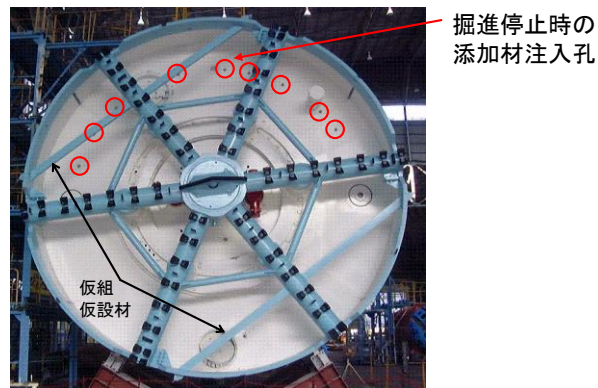


図 4-97 掘進停止時の添加材注入孔

一方、掘進中においては、添加材の注入はフィッシュテールでほぼ 60%程度が注入され、その他はスポーク部から注入されるのが一般的であるが、掘削土量に対して 25～30%の注入量を確保するため掘進速度に連動させた一定の設定量を注入することとなる。この注入は地山に対して行われることから、図 4-98 に示すように、通常は吐出位置に関わらず、泥土圧の約 3 倍程度の圧力を要することになり、停止中の注入圧の 2 倍程度となっている。

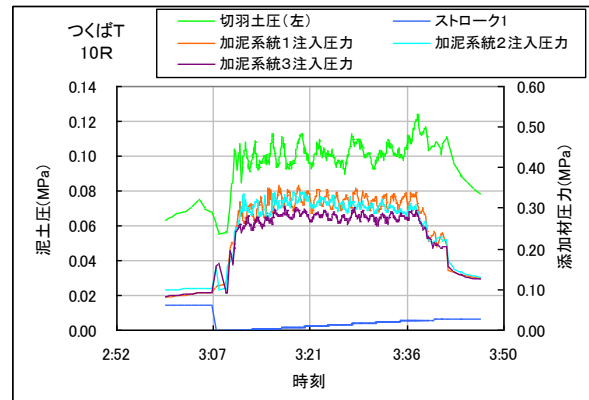


図 4-98 掘進中の添加材注入圧と泥土圧の変動

次に、掘進停止中に注入された添加材の挙動を推定する。隔壁部の注入孔から注入される添加材は、隔壁と泥土の間隙に入り込み、泥土に注入圧相当の流体圧を作用させることになる。そして、図 4-93、図 4-96、図 4-98 に示すように、時間当たりの注入量は、掘進時の 1/20 程度であり、また注入圧が低いことから、注入後の一時的に上昇する泥土圧は、短時間で低下を始めることから、添加材の注入は継続して行う必要がある。

隔壁部に固定している土圧計は、添加材の吐出口に近いことから、添加材注入による圧力変動を計測することになるが、その状況を図 4-99 に示す。チャンバー内の鉛直計測位置の異なる土圧計にほぼ同程度の圧力が加わっている状況が明らかに把握できる。

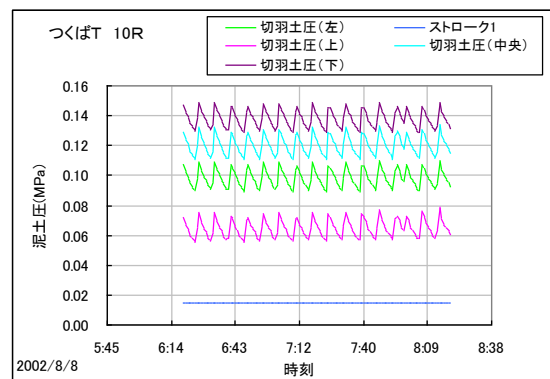


図 4-99 掘進停止中の泥土圧の変動

この状況については、次の二通りの状態が生じるものと推測される。

- ① 加圧注入された添加材は、一部は直接地山に作用することになり、間隙水圧に変動を与えることになるものの、既存の泥土に入り込むことなく、ほぼ隔壁部に沿って広がり、泥土全体を切羽方向へ押し付けることになる。この場合には、泥土と添加材は「混合されることは無く、添加材は遊離した状態」にある。そのため再掘進時には、スクリーコンベヤーからの水分が多い土砂の噴出を防ぐために、排土の前に攪拌混練に注意する必要があると考えられる。
- ② 泥土圧の約 1.5 倍の圧力により加圧注入される添加材の一部は泥土に浸入して、混練はなされないものの、泥土を一部排除して、その位置に入り込むことにより泥土と一体の物体として地山に作用する。

いずれの場合においても、添加材の加圧注入によりチャンバー内全体の泥土を隔壁側から切羽に対して押し付けることになり、切羽安定に寄与する作用効果があると考えられる。

図 4-100 には、掘進停止中に添加材注入を行った場合と行わなかった場合の掘進停止後の泥土圧低下の状況を示している。ここでは、泥土圧がある一定値より低下しないように添加材注入圧と注入量を制御しているが、添加材注入により泥土圧の低下が明らかに防止されていることがわかる。

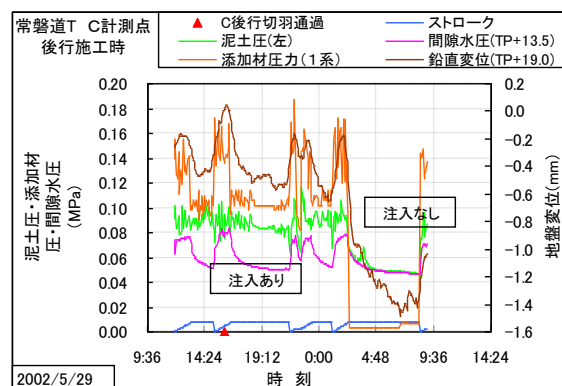


図 4-100 掘進停止中の添加材注入による地中沈下、地山間隙水圧および泥土圧の変化

一方、添加材注入圧の地山側への作用については、地山の間隙水圧・土水圧・地盤変位により、この作用の程度を検証することができる。

まず、地盤変位と間隙水圧の変動についてであるが、掘進の停止中の添加材注入による地山側の反応について図4-101～図4-104に示す。

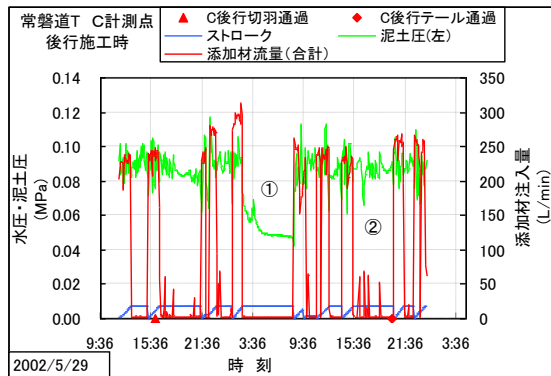


図4-101 添加材注入量と泥土圧の変動

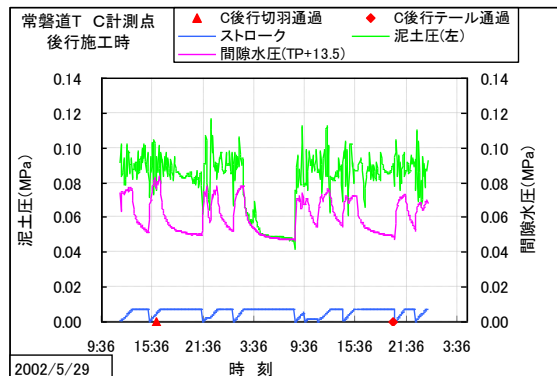


図4-102 泥土圧と地山間隙水圧の変動

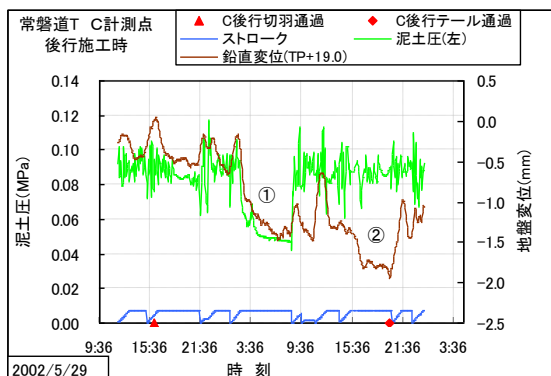


図4-103 泥土圧と地盤鉛直変位の変動

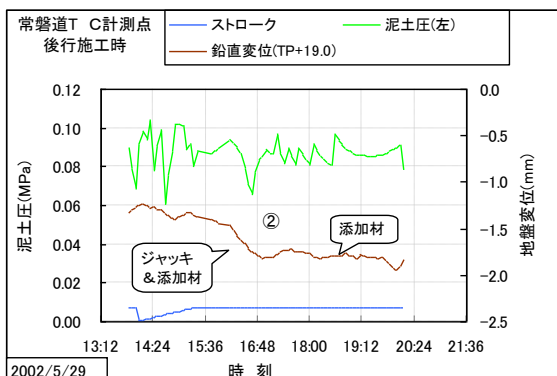


図4-104 泥土圧と地盤鉛直変位の変動

〔図4-103の拡大図〕

図4-101には、地山の間隙水圧計測点位置をシールド切羽及びテールが通過する間の掘進と停止に伴う泥土圧の変動と添加材注入量を示す。

ここでは掘進停止時における添加材注入の有無が図中の①および②から確認できる。図中の①は圧力保持注入無し、②は注入ありのケースである。

図4-102には、間隙水圧の変動を示す。停止中に添加材が行われた②においても、間隙水圧は、注入がなされていない①の場合と同様な低下を示している。

しかしながら、図4-103に示す地盤の鉛直変位については、②の沈下傾向は①の場合と全く異なっていることがわかる。

図4-104には、②の拡大図を示すが、添加材の注入の開始により、泥土圧の低下が抑止されて、一旦低下し始めた地盤変位の低下速度が極端に遅くなっており、添加材注入の作用の影響が明瞭に確認できる。

掘進停止中の鉛直地盤変位は、掘進により生じた過剰間隙水圧の浸透消散に伴い鉛直方向の有効応力が増加することにより沈下が生じることについてはすでに述べた。

ここでは、停止中に添加材注入が行われた場合に計測された地山変位の発生メカニズムについて考える。

計測結果により、添加材の注入によっては、間隙水圧の変動がほとんど生じないことから、添加材注入の作用は、それにより沈下が抑止されることから、天端から上方ではその作用は地山を上方に持ち上げる役割を果たすものである。

隔壁部の注入孔から注入された添加材の、泥土圧を変動させる作用については前述したとおりであり、その際添加材が泥土中に入る場合と、隔壁に沿って拡がり地盤に圧力を直接作用させる場合の可能性について述べたが、いずれの場合にも地山中の間隙水を大きく変動させることには至らないことから、注入による泥土圧の上昇圧力が切羽に作用し、図4-105に模式的に示すようないわばポアソン効果のように地山を持ち上げる。すなわち、三次元的には、「地山を押し広げる方向」に働くものと考えられる。

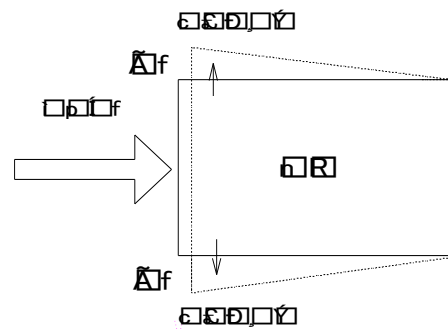


図 4-105 掘進停止中の添加材注入圧の地山への作用模式図

このことから、チャンバー内泥土圧の維持のために実施される掘進停止中の添加材注入では、添加材の注入圧、注入量、注入継続時間や注入される場所の条件、泥土の特性に応じ、注入された添加材が直接切羽と接する部分には添加材注入圧が、他の部分では注入によって上昇した泥土圧が地山に作用して、地山を押し広げる方向に変位させることになるものと考えられる。

このような地山への影響は、①作用力が全応力として地山に作用すること、②作用によって地山の間隙水圧の上昇が起こらないか、起こってもすぐに過剰間隙水圧が消散して作用力にバランスする有効応力の増大が生ずる条件のときには、その作用がジャッキ推力であるか添加材注入圧であるかを問わず、さらに泥土圧の場合にも発生すると考えられ、作用力としては①の要件を備えていること、地山としては②の要件を備えていることが条件となる。ここでは添加材注入圧、ジャッキ推力、泥土圧は、ともに地山に作用する場合単独で①の要件を満たしているものと言える。

掘進停止中の鉛直地盤変位は、掘進により生じた過剰間隙水圧の浸透消散に伴い鉛直方向の有効応力が増加することにより沈下が生じることについてはすでに述べた。

ここでは、停止中に添加材注入が行われた場合に計測された地山変位の発生メカニズムについて考える。

計測結果により、添加材の注入によっては、間隙水圧の変動がほとんど生じないことから、添加材注入の作用は、それにより沈下が抑止されることから、天端から上方ではその作用は地山を上方に持ち上げる役割を果たすものである。

隔壁部の注入孔から注入された添加材の、泥土圧を変動させる作用については前述したとおりであり、その際添加材が泥土中に入る場合と、隔壁に沿って拡がり地盤に圧力を直接作用させる場合の可能性について述べたが、いずれの場合にも地山中の間隙水を大きく変動させることには至らないことから、注入による泥土圧の上昇圧力が切羽に作用し、図4-105に模式的に示すようないわばポアソン効果のように地山を持ち上げる。すなわち、三次元的には、「地山を押し広げる方向」に働くものと考えられる。

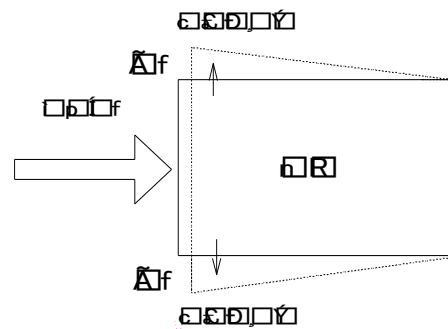


図 4-105 掘進停止中の添加材注入圧の地山への作用模式図

このことから、チャンバー内泥土圧の維持のために実施される掘進停止中の添加材注入では、添加材の注入圧、注入量、注入継続時間や注入される場所の条件、泥土の特性に応じ、注入された添加材が直接切羽と接する部分には添加材注入圧が、他の部分では注入によって上昇した泥土圧が地山に作用して、地山を押し広げる方向に変位させることになるものと考えられる。

このような地山への影響は、①作用力が全応力として地山に作用すること、②作用によって地山の間隙水圧の上昇が起こらないか、起こってもすぐに過剰間隙水圧が消散して作用力にバランスする有効応力の増大が生ずる条件のときには、その作用がジャッキ推力であるか添加材注入圧であるかを問わず、さらに泥土圧の場合にも発生すると考えられ、作用力としては①の要件を備えていること、地山としては②の要件を備えていることが条件となる。ここでは添加材注入圧、ジャッキ推力、泥土圧は、ともに地山に作用する場合単独で①の要件を満たしているものと言える。

4.7 結論

6箇所の現場計測結果と掘進管理情報をもとに、土圧式シールド施工時に発生している地山挙動を分析し、その発生メカニズムを、地山へのシールド側からの作用力と作用機構および、それに対する有効応力の原理に従う地山特性の視点から推論した結果、次の結論を得た。

(1) 帯水砂質地盤のシールド施工に伴い切羽を中心とするシールド側、地山側で発生している現象を、その推定したメカニズムとともに示すと、次のようになる。

- ① 掘進が開始され、地山掘削が始まると、添加材の注入、掘削土砂との攪拌混合が開始され、チャンバー内で掘削土の泥土化が進む。
- ② 泥土化の過程で発生した掘削土砂に含まれる間隙水を中心とする泥土化に用いられなかった余剰水が泥土圧と総推力の 20%程度の大きさを有するビット圧によって地山に排出される。この排出は掘進中、継続的に行われる。
排出される水の圧力は、地山の静水圧よりはずっと大きく、泥土圧に近い値であり、切羽近傍では、地山間隙水圧が泥土圧にほぼ等しくなる事態も想定される。
- ③ このことは、地山への排出の源は余剰水の圧力を高める泥土圧を主体とする圧力であり、とりわけ泥土圧は余剰水圧力上昇に対して全応力的な作用をしているものと考えられる。
- ④ 地山側に浸入した圧力水は、シールド側から継続的に排出される圧力水によって、切羽から奥の地山へ浸透していく。この浸透に伴って水の圧力は減少していくものの、切羽から 30m 以上遠方の地山の間隙水圧も上昇させる。
- ⑤ この上昇した間隙水圧により、有効応力の原理に基づいて地山が隆起するとともに、間隙水圧が低下すると地山も沈下に転じる。地山の隆起量は間隙水圧の上昇量によって決まる。間隙水圧の変化と地山水平変位にも強い相関関係が見られるものの、その方向性を説明できる段階にない。
- ⑥ 掘進停止に伴いシールドの推進力が消失して、シールド側から地山への水の排出が停止するとともに、ビット圧も消失し、泥土圧も一旦、急激な低下を示し、その後、徐々に低下していく。また、一般には、添加材注入も停止し、添加材注入圧も消失する。

この急激な泥土圧の低下に対しては、泥土の物理的な特性が大きく関係しているものと考えられるが、以後の緩やかな低下は、主として、掘進中は推進力によって地山に主働的な作用を及ぼしていた泥土圧が、推進力の消失により、地山からの圧力を受けてバランスする受働的な圧力に変わったことにより、地山の間隙水圧や有効応力の変化に応じて変化していく状態を示しているものと考えられる。

- ⑦ シールド側からの圧力水の浸入の停止により地山内間隙水圧は、圧力水の浸入に

よって維持されていた分に相当する分の圧力を急激に失う。以後は、周辺地山の間隙水圧との差で生じる浸透による過剰間隙水圧の消散に応じて緩やかに低下していく。また、この地山内の過剰間隙水圧の消散に伴って、隆起していた地山も沈下していく。

- ⑧ 掘進中にシールド側で加えられる添加材注入圧は、掘削土とそれに含まれていた間隙水など切羽の注入される状況に応じて泥土圧を上昇させる。
 - ⑨ 掘進停止中に行われるセグメント組立に伴うジャッキ圧の作用は、泥土圧に影響を与えるものの、むしろ、このとき行われるシールド機の姿勢制御（ピッチング）によるジャッキ作用のほうが泥土圧に影響を与える。
 - ⑩ 掘進停止中に泥土圧低下を抑止するために実施されるジャッキ圧の作用は、泥土圧を上昇させ、上昇した泥土圧として地山に作用するほか、直接的な地山への全応力な作用として泥土圧の低下と地盤沈下の抑止の目的を果たす。
 - ⑪ 掘進停止中に同様の目的で実施される添加材の注入は、泥土圧を上昇させ、上昇した泥土圧として地山に作用する。また、一部は、直接、切羽での地山へ作用することが考えられるが、いずれも地山に対して全応力的な作用として、泥土圧低下と地盤沈下の抑止の目的を果たす。なお、泥土圧の上昇には、直接泥土を押す隔壁部からの注入が有効である。
 - ⑫ このとき、推進ジャッキの作用、添加材注入圧の作用の効果の鍵は、泥土圧の作用の鍵と同様に地山に対して全応力的な圧力を及ぼすことと継続的な作用である。
- (2) シールド機から地山への作用は、基本的には、シールド機の推進力を源とする泥土圧およびビット圧と添加材注入圧の作用と停止である。これらの作用の地山への影響は、地盤特性と作用力の大きさはもとより、地山とシールドの接触環境と泥土の性質に依存する泥土圧の地山への作用特性によるところが大きい。また、作用力の大きさは、推進力の大きさに加え、カッタースポークの回転、添加材注入圧によって変化する。
- (3) 泥土圧の地山への作用は全応力的な圧力作用であり、この作用は掘削土とは異なる泥土の性質に起因した作用と考えられる。泥土の性質を決定する鍵は、必要な特性の泥土を作る泥土化のプロセスの着実な達成と泥土化に用いる添加材の性質であり、この2つの鍵については、泥土に求められる特性とともに更に深度化した研究が求められる。
- (4) 確認された地山挙動は、適切な泥土ができ上がっていることを前提としたシールド側から地山への作用力に対する地山の反応であり、推定される挙動発生のメカニズムは、有効応力の原理に従うものとして説明できる。したがってその挙動を推定す

るにあたっては、切羽における地山側とシールド側の応力バランスの変化を考えることが重要となる。

- (5) (1)で述べた地山挙動とその発生メカニズムは、掘進中に適切な泥土が出来ていくことが前提であり、その条件下で観測された重要な地山挙動は、掘進中のシールド側から地山への水の排出と地山への浸透と掘進停止に伴う水の排出の停止と泥土圧の変化であり、(3)の結論に加え、水の排出のメカニズムの検証と泥土圧の作用機構の解明も重要な課題と考えられる。

参考文献

- 1) 平手知：超低土被り条件下におけるシールド施工ーつくばエクスプレス 常磐道 Tー，日本鉄道建設公団第 38 回技術研究会講演概要集，2002 年 10 月
- 2) 松永卓也：高速道路直下の超低土被りシールドーつくばエクスプレス常磐道トンネルー，日本鉄道施設協会誌，2003 年 8 月
- 3) 石徳博行，松永卓也，平手知，岸本章士：つくばエクスプレス（常磐新線）常磐道トンネルにおける超低土被りシールドの施工，土木学会年次学術講演会，2003 年 9 月
- 4) 鈴木信一，黒岩厚夫，松永卓也，岸本章士：高速道路直下の極薄土被りを掘進管理で克服ーつくばエクスプレス 常磐道トンネルー，トンネルと地下，2004 年 1 月
- 5) 種田昇，高嶋雅彰，西田義則，和田幸治：超近接併設トンネルを泥土圧シールドで挑むーつくばエクスプレス つくばトンネルー，トンネルと地下，2003 年 5 月
- 6) 小野頤司，清水一郎，西田義則，廻田貴志：離隔 30cm 以下の併設泥土圧シールドーつくばエクスプレス つくばトンネルー，トンネルと地下，2004 年 2 月
- 7) 江島武，小野頤司：超近接の併設シールドトンネルの施工について，土木学会年次学術講演会，2004 年 9 月
- 8) 小林寛明：大断面泥土加圧シールドで総武流山電鉄直下を横断ーつくばエクスプレス南流山トンネルー，鉄道・運輸機構第 1 回技術研究会，2003 年 10 月
- 9) 小林寛明，神田大：大断面泥土加圧シールドで総武流山電鉄直下を横断ーつくばエクスプレス南流山トンネルー，土木学会年次学術講演会，2004 年 9 月
- 10) 日本鉄道建設公団名古屋支社ほか：上飯田連絡線・瀬古トンネル（シールド）施工検討会資料，平成 10 年 7 月・平成 12 年 1 月
- 11) 関西高速鉄道株式会社ほか：片福連絡線福島シールド T 工事シールド機械技術検討会資料，平成 4 年 4 月
- 12) 関西高速鉄道株式会社：片福連絡線技術委員会・福島シールド T 工事の施工について，平成 5 年 12 月
- 13) 深沢成年，藤田一昭：実施工における掘削刃の磨耗特性についてーJR 東西線のシールドー

ド工事ー

- 14) 木村博生, 佐々木浩, 沖西学: 世界最大級の土圧式シールドで交通渋滞を解消 加島
天下茶屋線外1路線と阪神本線との立体交差事業, トンネルと地下, Vol.24, No.2,
pp.13-19, 1993
- 15) 岡二三生: 土質力学演習, 森北出版(株), 1995.9
- 16) 岡二三生: 地盤液状化の科学, 近未来社, 2001.7
- 17) 石原研而: 有効応力解析は実挙動をどれだけシミュレートできるか, 液状化地山にお
ける基礎設計の考え方, 日本建築学会, pp.47-92, 1998
- 18) 里 優ほか: ダイラタンシーの有効封圧依存を考慮したトンネルの変形解析, 岩盤力
学に関するシンポジウム講演論文集, Vol 26, pp.475-479, 1995
- 19) 里 優: 連成解析ってなんだ, 数値解析(有限要素法編), 地層科学研究所, 2002.11
- 20) 阿部和毅, 石田喜久雄: 泥土圧シールドの切羽安定の研究(その2), 三井建設技術研
究報告 第18号, pp.283-290, 1993
- 21) 齋藤優, 山田清臣: 泥土圧シールド工法における掘削礫質土の土性改良, 土木学会論
文集VI, pp.75~87, 1998.3
- 22) 阿部和毅, 石田喜久雄: 滞水玉石砂礫地盤における泥土圧シールド掘削土の塑性流動
性に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, Vol.48,
pp.100-101, 1993
- 23) 鈴木氏との私的対論による
- 24) 加島豊氏提供: 外径1m泥土加圧シールド実験機掘進実験, 1976
- 25) 栗原宏武・石谷尹利・玉井達郎・竹内利彦: 帯水砂・砂礫層を対象とした土圧シール
ド工法の開発研究(その2), 鹿島建設技術研究所年報第31号, pp.151~158, 1983
- 26) 寺本博明, 山口弘則, 可川清人, 坪井広美: 世界最大径の泥土圧シールド 平野川調
節池築造Ⅲ期工事, トンネルと地下, Vol.30, No.3, pp.235-244, 1999

第5章 地山挙動のメカニズムを明確にするために必要な追加検討

5.1 はじめに

本章では、第4章で推論したメカニズムにおける推論の根拠となる考え方について、数値解析と他の計測結果、材料特性や土質力学の理論をもとにその推論の信頼性を高めるための検討を行う。その内容は、

- ① 地山への水の排出とそれによる地山間隙水圧の上昇について
- ② 泥土化のプロセスと泥土の物理特性
- ③ 泥土土水一体作用のメカニズム
- ④ 掘進停止後の泥土圧低下の要因

の4点であり、①については、浸透流解析により、②と③については、材料特性と土質力学理論をもとに、④については、他の計測結果に基づいて考察する。

5.2 浸透流解析による地山間隙水圧変動過程の考察

5.2.1 浸透流解析の目的

帯水地盤における土圧式シールドの施工により、トンネル周辺地山の間隙水圧は掘進中には上昇し、掘進を停止すると時間経過とともに低下する現象が計測された。また、第4章では、この過剰間隙水圧の発生と消散は、他の諸現象とともにシールド掘進中にはシールドマシンから地山中への強制排水により過剰間隙水圧が発生し、掘進の停止により過剰間隙水圧の浸透消散による水圧の低下によるものであると推測した。本節では、三次元浸透流解析により、その推測の妥当性を検証する。

5.2.2 周辺地山の間隙水圧の変動

常磐道トンネルの後行シールドが常磐自動車道交差部（D計測点）を通過するときに計測された間隙水圧変動についてシミュレーション解析を行う。間隙水圧の測定は先行シールド施工後に、そのセグメントの組み立てに用いる孔を利用して、裏込注入域の背面先の地山中の水圧を45度ピッチで計測したものである。その位置関係を再掲して、図5-1に示す。

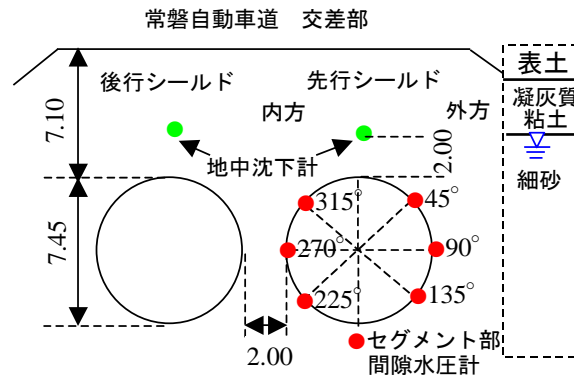


図 5-1 D 計測断面図

図 5-2 には、D 測点で先行セグメントの S L 位置すなわち 270 度に設置した間隙水圧計測値を示す。各リングの掘進開始と共に上昇し、掘進が停止すると、ほぼ上昇前の値まで低下する。また、切羽の接近と通過に伴い間隙水圧の上昇量が変化するとともに、また、掘進の停止に際しては、停止時間が長期に及ぶと上昇した間隙水圧は、概ね 0.055MPa 程度と推測される静水圧に近づくまで低下をする状況を示している。

図 5-3 は計測値と切羽距離の関係を示したものである。これによると第 4 章結論でも示した計測点と切羽の距離が前後 30m 以上になっても、水圧変動の影響があることがわかる。

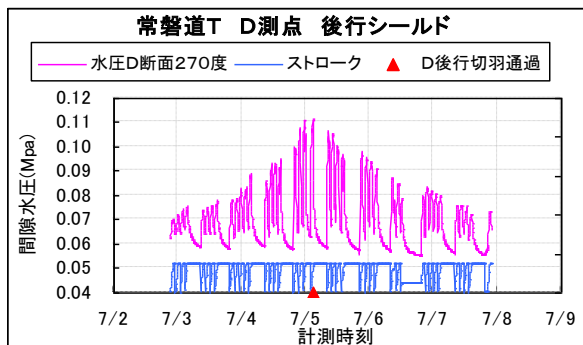


図 5-2 掘進と間隙水圧変化 (内方側)

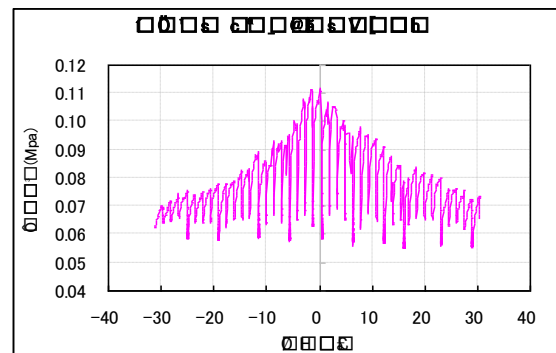


図 5-3 切羽距離と間隙水圧の変化

図 5-4 は、先行セグメントに設置した後行側（内方）の間隙水圧計（225～315 度位置）の経時変化を示している。また、図 5-5 には後行セグメントと反対側（外方）の各位置（0～135 度）の計測値を示す。

内方側の各計測位置においては、その上昇量はほぼ同様であり、切羽到達直前に最大となり、約 0.04MPa 程度の増加値を示している。掘進を停止すると間隙水圧は低下し、この図の範囲内では、ほぼ一定の水圧状態に戻っている。

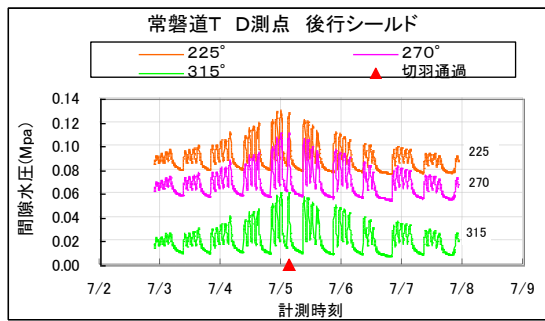


図 5-4 掘進と間隙水圧変化（内方側）

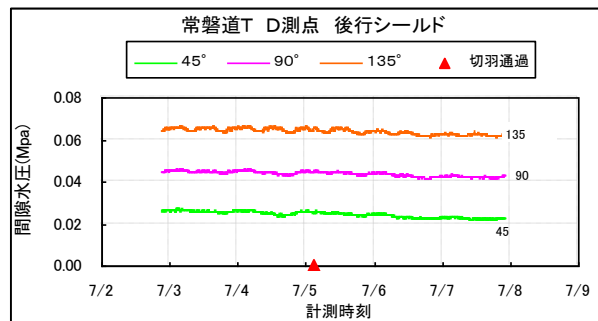


図 5-5 掘進と間隙水圧変化（外方側）

外方の間隙水圧変動は、シールド掘進の影響をほぼ受けないゾーンの水圧を計測していると考えられるものの、図 5-4 の掘進停止時に低下した間隙水圧は、図 5-5 での同一鉛直高さでの外方の水圧とは相異しており、外方も後行シールドの施工による影響が及んでいる可能性は否定できない。

図 5-6 は、シールド中心水平位置の 270°と下方 225°および上方 315°位置の計測値の差をそれぞれプロットしたものである。両計測点は、SL を軸にして鉛直方向に対称な上下位置にあることから、両グラフは、0 を基点にして、ほぼ同様の離隔を有することになるものと推測される。すなわち、鉛直計測位置の差により約 0.026MPa の差が生じ、またマシン外周からの水平距離の差異もそれに加わるもののほぼ同等の差異を生じるものと考えられるが、計測値は約 0.03MPa(0.02～(-0.05))相異しており、この相異はシールド接近の影響がほとんど無い時期から生じていることから、計測機器の設置や精度の影響が含まれているものと考えられる。

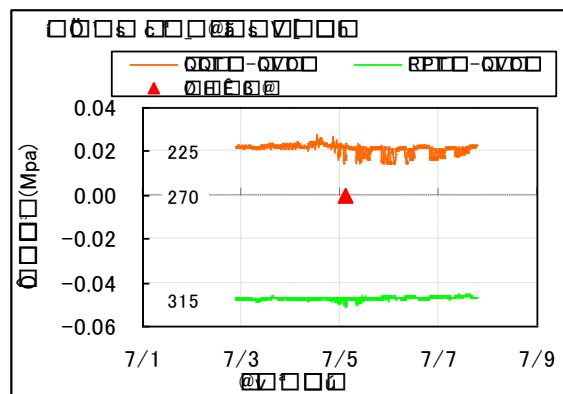


図 5-6 間隙水圧の変動差

図 5-7 に後行シールド直上 2m の地中地盤変位を 270°位置の間隙水圧と合せて示す。間隙水圧上昇時に地盤の隆起、低下時（消散時）に沈下を繰り返しながら、切羽到達前からテール通過後にかけて全体的には沈下を示している。図 5-8 に切羽通過時の 1 リングの掘進開始から停止期間中の変動を示す。この図より間隙水圧の変動に強い相関性を持って鉛

直地盤が変位している状況が確認される。

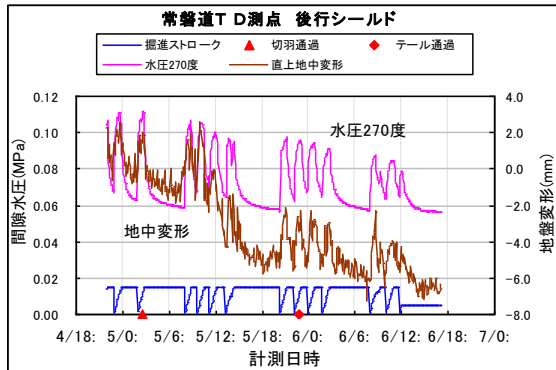


図 5-7 地盤変形と間隙水圧の変化

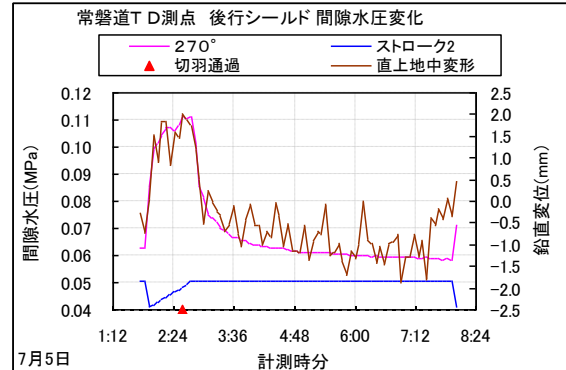


図 5-8 間隙水圧変化の詳細

5.2.3 解析手法

ここで実施する解析は、シールド掘進に伴う間隙水圧変動についてのシミュレーション解析であり、間隙水圧の変動の計測結果と照合することにより、シールドマシン部から「掘進により水を地山に強制排出する作用により過剰間隙水圧が発生し、掘進の停止に伴い過剰間隙水圧が浸透消散し、ほぼ静水圧まで低下する」との推論の妥当性を検証しようとするものである。

本来、掘進に応じた地山の切削に伴う間隙水圧の変動と有効応力変化による地盤変位を一体的に解析することを終局目的とするところであるが、一般的にトンネル掘進に伴う土・水連成解析による地盤変形の三次元解析を行った場合においては、計測結果と類似する間隙水圧変動と地盤変形に到達することは困難であり、また近似した結果を得たとしても、掘進条件と乖離した入力条件の設定が必要になる等、単に特殊なフィッティングに終わってしまうことも考慮して、地山の間隙水圧の変動のみについて追跡する浸透流解析を行うこととした。

5.2.4 有限要素法による三次元浸透流解析

① 支配方程式

浸透流解析における運動方程式は次に示すダルシーの法則で表される。

$$u = k_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = k_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad w = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (5.1)$$

ここに、 u , v , w は x , y , z それぞれの方向の流速、 k_x , k_y , k_z は同じくそれぞれの方向の透水係数、 h は全水頭である。一方、連続条件式（質量保存則）は次式で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + Q - S_s \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

ここに、 Q は単位体積当りの発水量、 S_s は比水分容量（貯留係数）、 t は時間である。
上の2式から次の支配方程式が得られる。

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + Q - S_s \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (5.2)$$

上式を解くにあたっては、境界 S における境界条件が考慮されなければならない。境界条件は次の2種類である。

$$h = h_b \quad (5.3)$$

$$k_x \frac{\partial h}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial h}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial h}{\partial z} l_z + q = 0 \quad (5.4)$$

ここに、 h_b は既知水頭、 l_x 、 l_y 、 l_z は境界面上における外向き法線方向の余弦、 q は境界面上の流出入量で、すべての境界は上の2式のうちのどちらかに属することになる。

② モデル化及び条件設定

モデル化及び解析条件の設定は、次のa～hによった。

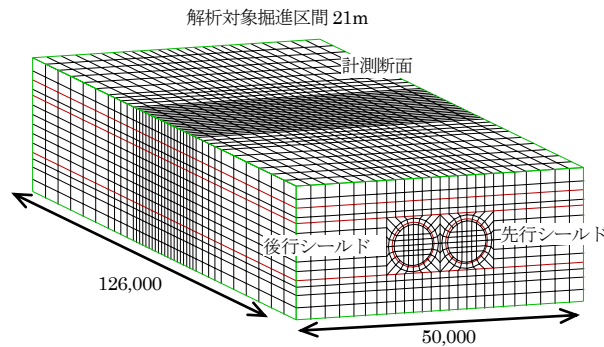


図 5-9 解析モデル

- a: モデル要素は6面体の3次元アイソパラメトリック要素で、図 5-9 にその概要を示す。
- b: 天端上部の地層条件は不飽和状態であることも推測されるが、上部に透水性が低い粘土層があることと概略の検討であることを考慮して、本解析では地層全体を飽和領域と仮定する。
- c: 初期間隙水頭（静水圧）は、計測によりシールド天端より 1m 上と設定する。
- d: セグメント長 1.5m 掘進を 1 時間、停止（セグメント組立）を 1 時間 4 リング掘

進ごとに4時間の放置期間置く半日の施工サイクルとし、解析は3サイクル分とする(図5-10)。

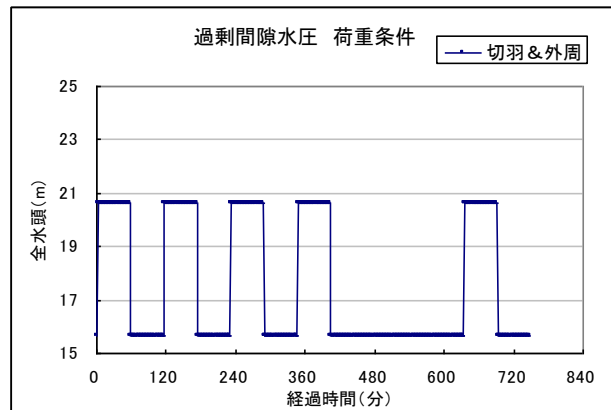


図5-10 マシンからの排水圧力と時間変動

- e: 本解析では、与条件を簡素化するため、シールドから地山への作用力（水圧）をマシンの切羽及び外殻の境界面で一定の水頭を設定することにより解析を行う。
- f: シールド外周部については、地山とマシンの隙間に切羽から泥土圧の回り込みがあると想定して切羽部と等しい過剰水圧を与える。
- g: 掘進に伴う泥土圧にはほぼ変動がないこと、即ち掘進中の泥土圧は設定泥土圧値に保持されているとして、掘進時(約1時間)に排水圧力を泥土圧相当の0.10MPaとし、掘進停止時(約1時間)にはもとの静水圧を作用させる。
- h: モデルの掘進方向の両端は不透水境界とし、シールド直角方向は先行トンネルと後行トンネルの中心からそれぞれ25m離れた地点は初期水位の一定境界とする。

③ 解析範囲

D断面計測点を図5-9の解析対象掘進区間21mの中心として前後それぞれ52.5m、合計126m区間を解析領域とした。施工期間は、D断面に切羽が到達する6m(4リング)手前から開始し、テール通過後6m(4リング)までとする。また切羽からテールまでの距離は、マシン長の9mである。

④ 地山物性等の入力値

シールドが通過する地盤透水係数は砂層で $k=1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、上部の表土凝灰質粘土層は $k=1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 、貯留係数はいずれも $S_s=0.001$ とした。解析に用いた地山物性値を表5-1に示す。また土被りは7.1mである。

表 5-1 解析に用いた地山物性値

	層厚 (m)	ヤング率 (kN/m ²)	ポアソン 比	透水係数 (cm/s)
表土 (盛土)	3.60	17000	0.45	1.0×10^{-5}
凝灰質粘土	2.50	16000	0.45	1.0×10^{-5}
細砂	—	16800	0.35	1.0×10^{-3}

5.2.5 解析結果

上記条件による解析結果と実測値について照合を行う。図 5-11 は 270°位置について示したものである。初期値は計算値の方が小さく、また変動の振幅も計算値の方がやや小さい。また影響が出始めるタイミングは測定値の方が早く、影響が継続する期間（距離）も測定値の方が遅い時期までとなっている。これらの相違の原因としては、マシン切羽と外殻で設定した境界部の間隙水圧が若干小さかったことに加えて、停止時に収束する水圧は、4時間の停止時間では、まだ静水圧まで低下せず、少し高い値になっていることなどが推測される。

これらの結果を考慮して、初期値に 0.01MPa 加える補正を行い、時間軸を 9 時間程度前倒して、フィッティングを行ったグラフを図 5-12 に示す。

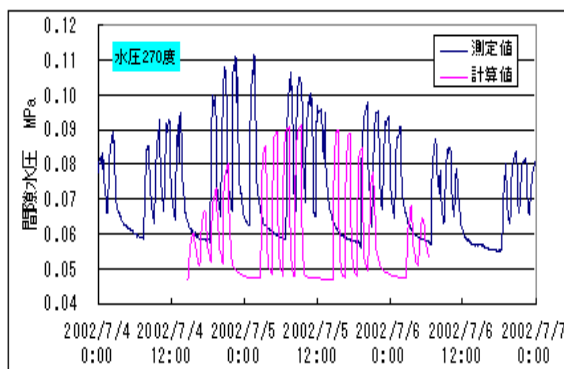


図 5-11 解析結果と実測値の照合

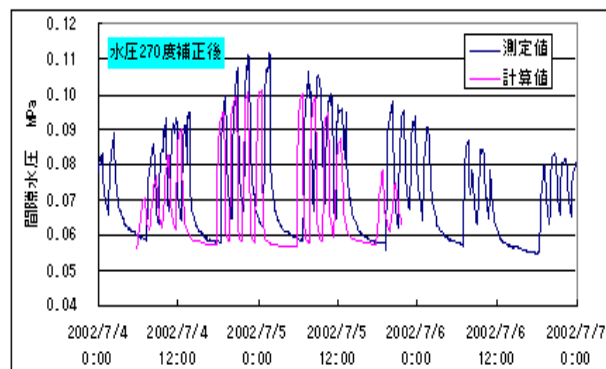


図 5-12 解析結果と実測値の照合

5.2.6 計測値との照合と分析

図 5-13 と図 5-14 に解析結果を示し、図 5-4、図 5-5 に示した計測結果と対比して、その相異点について照合する。図 5-13、図 5-14 において切羽到達はほぼ 0.5 日、テール通過はほぼ 1.2 日に相当する。

計測値に比べて切羽到達前の変動が小さいこと、切羽通過後に最大圧力となっていること、計測ではほとんど変化しない外方 45°～135°の計測点において、小さいながらも変動

が生じていることなどが異なることがわかる。

一方、切羽通過後の間隙水圧の上昇は、マシン外殻全長において「境界水頭として、切羽と同等の水圧」を設定したことから、マシン通過時においても、その影響が顕著に現れているものと考えられる。

以上のことから、全体としては掘進と停止に伴う間隙水圧の変動は、計測された変動を概ね再現していると考えられる。

次に、切羽の進行に伴う過剰間隙水圧について、計測点に切羽が到達した時点の状態について、後行シールドの中心部から先行シールド側を抽出してカラーコンターで図 5-15 に示す。青色が初期水圧、マシン切羽・外殻の朱色が境界排出圧である。

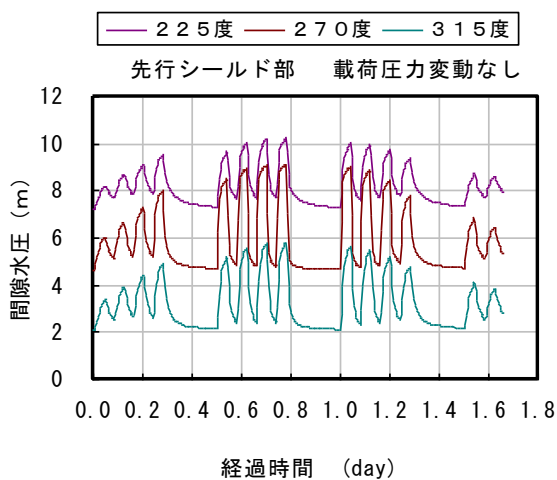


図 5-13 解析結果 (1)

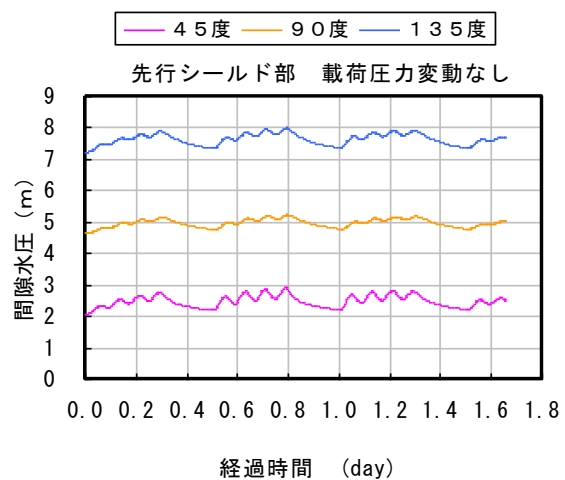
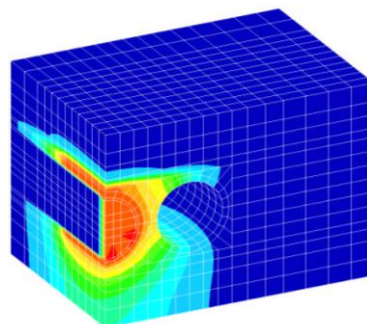


図 5-14 解析結果 (2)



凡例：
赤：ほぼ泥土圧
紺：静水圧

図 5-15 切羽到達時の圧力分布

- ① 図 5-16 は透水係数を変動させて感度分析を行ったものである。間隙水圧変動は透水係数に密接な関係が存在することを示しており、一定の排水圧を持って定速度で掘進した場合においても、地山の透水係数により、過剰間隙水圧の増加形態が異なり、また停止に伴う過剰間隙水圧の低下の形態も異なることが確認できる。
- ② 図 5-17 は透水係数に応じた地山への浸透量の経時変化を示したものである。掘削時に

地盤中へ水が浸透し、停止時には若干戻る挙動を繰返し、例えば透水係数が $2.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ の場合には約 $20 \text{m}^3/\text{リング}$ の浸透流量となっている。これは 1 リング分の掘削体積約 65m^3 の 30% に相当する数量である。図 5-18、図 5-19 に示すように、添加材注入量は約 350L/min で、1 リングあたり約 19m^3 程度となっている。注入圧力は泥土圧の 3 倍程度となっていることから、帯水性砂層の掘進に際して添加材の注入とチャンバー内での掘削土と添加材の混練の過程における余剰水が地山へ排水されているものと考えられる。

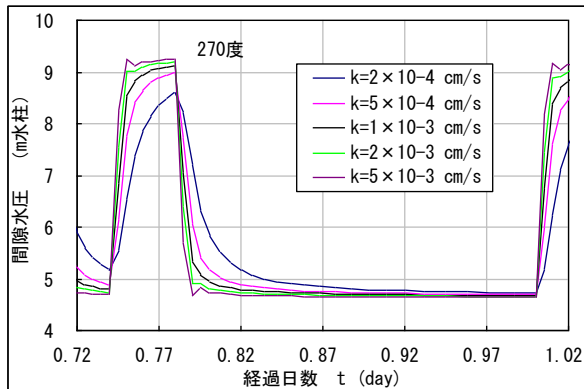


図 5-16 透水係数と間隙水圧変動との関係

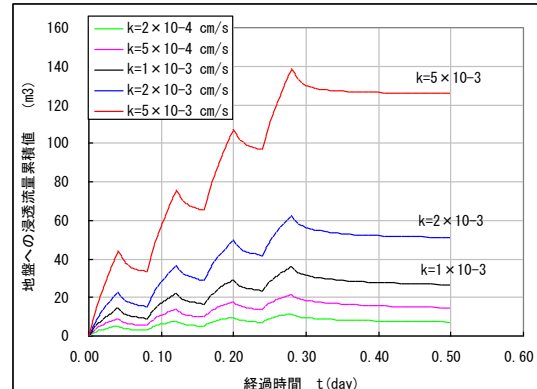


図 5-17 地盤への浸透流量の累積値

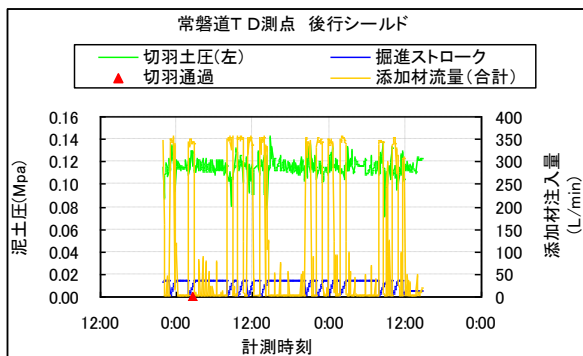


図 5-18 添加材注入量と泥土圧力

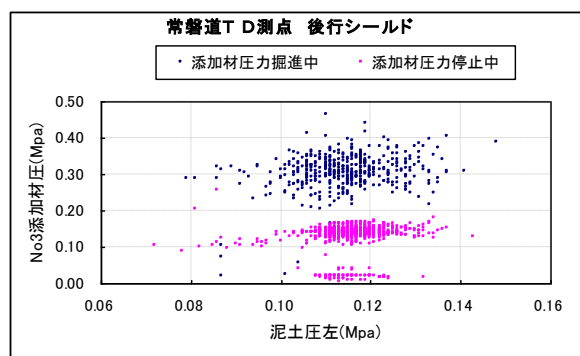


図 5-19 掘進時と停止時の添加材注入圧

5.2.7 カッター回転によるビット圧の間欠作用の検討

(1) 作用力と変動

土圧式シールドの掘進に際して、混練により過剰な水分を含まない適切な性状の泥土で掘進が行なわれる場合には、泥土化の過程で生じた「掘削余剰水」は、泥土に混じって排土されることはなく、地山に強制排水として還元されることがわかった。その「掘削余剰水」に過剰間隙水圧を与えて、地山への排出を起こす作用をしているのが、泥土圧・ビット圧・添加材注入圧の 3 つの切羽地山面に対する掘進作用であり、掘進中には、それぞれの作用圧力は「変動」をしている。

すなわち、

- 泥土圧は「掘削・攪拌・排土」作用により、掘進中は設定した管理値を中心として、ジャッキ推力と一定の相関性を有しながら不規則な変動を繰り返す。
- ビット圧は、スポークの回転に応じて地山の切削を行う過程において局所的、間欠的に地山に作用する力である。
- 添加材注入圧力は定量注入であるため注入先である泥土および地山の性状に影響され、概ね泥土圧の2～3倍の圧力により注入される。

(2) 三次元浸透流解析を用いた検討

前述のとおり掘削中に地山へ排出される余剰水量は、「変動する」ものと考えられるが、掘削中に計測される地山間隙水圧値には、変動する余剰水量に起因するような変動は、ほぼ検知されていない。

その理由を検討するため、前述の三次元浸透流解析の解析条件として掘進時に地山に排出する過剰間隙水圧すなわち切羽部の境界水圧が周期的に変動することを擬似的に考慮した解析を行った。

(3) 解析条件

境界条件として設定した間隙水圧を図5-20に示す。

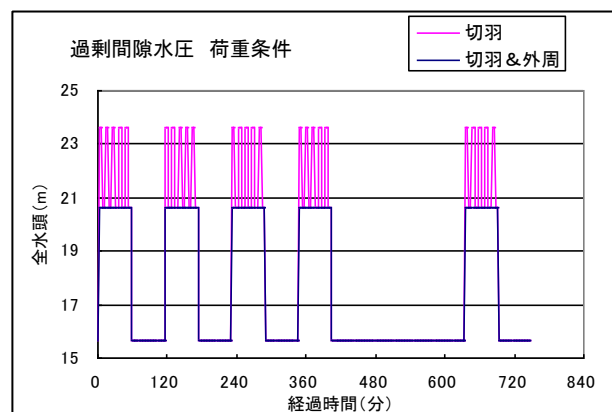


図5-20 切羽部変動水圧1サイクル

その他の条件は、5.2.4で示したものと同一である。切羽面では掘進中の0.05MPa（チャンバー内泥土圧に相当）の間隙水圧に加えて、変動圧力として0.03MPaの水圧を1時間の掘進中に5サイクル与えた。変動は、泥土圧の約60%である。

また、カッタースポークは本工事では概ね0.7rpmであり、さらに1パス（切削ライン）で2回以上掘削することから、一箇所当たりのビット圧の作用周期は、1～2回/分以上であると考えられる。しかしながら本解析では、カッター回転による概ねの変動影響を把握することを目的としていること及び計算容量と時間の都合により、カッターによる圧力の

変動作用の周期は、5回/時として、図5-20に示すとおり、6分後毎に载荷と除荷を繰り返す擬似解析を行うこととした。

(4) 先行シールド外周位置での解析結果

D断面先行シールド外周の間隙水圧解析結果について、図5-21には過剰間隙水圧変動を考慮しない場合、図5-22には変動を考慮した場合について示す。

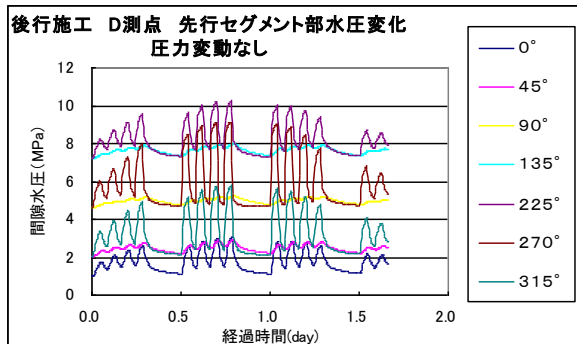


図 5-21 圧力変動なし

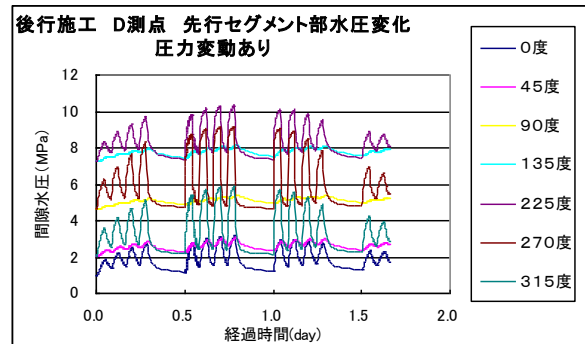


図 5-22 圧力変動あり

(5) 変動の有無による解析結果の比較

圧力の変動を考慮する場合としない場合での差をD断面 270 度位置(後行シールドに一番近い計測点 2mの離隔)について比較すると図5-23のようになる。この解析によると、切羽到達時における過剰間隙水圧の差異は、約 $0.265\text{m} \div 0.003\text{ MPa}$ であり、変動荷重値 0.03MPa の約 10%程度となっている。

図5-24には、切羽中心位置での水圧と先行シールド 270 度位置での間隙水圧の比較を示す。切羽中心では解析条件として設定した過剰間隙水圧の载荷状態を示しており、切羽到達の2リング手前ぐらいからビット変動圧を検知しているが、後行シールドの外周から2m離隔の270度位置では、ビット変動圧の変動の影響がほとんど及んでいないことがわかる。

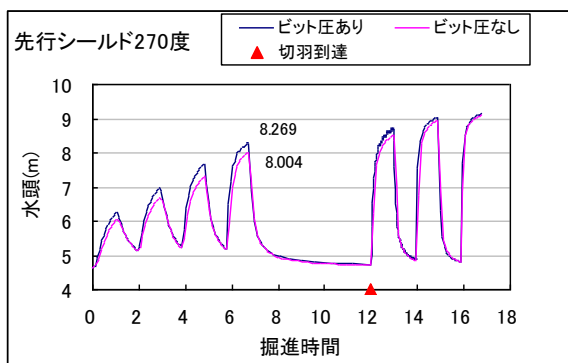


図 5-23 圧力変動の有無による比較

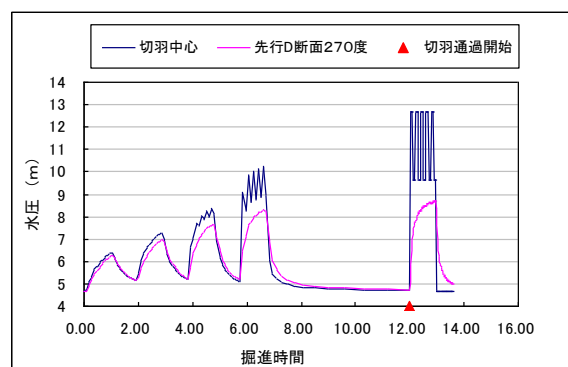


図 5-24 センター部との比較

(6) 変動排水圧力の前方への影響

図 5-25 は切羽がほぼ D 断面付近にあるときの、掘進・セグメント組立の 1 サイクル分の間隙水圧の前方への影響を示したものである。63m が D 断面切羽である。この図の分析から、次のことがわかる。

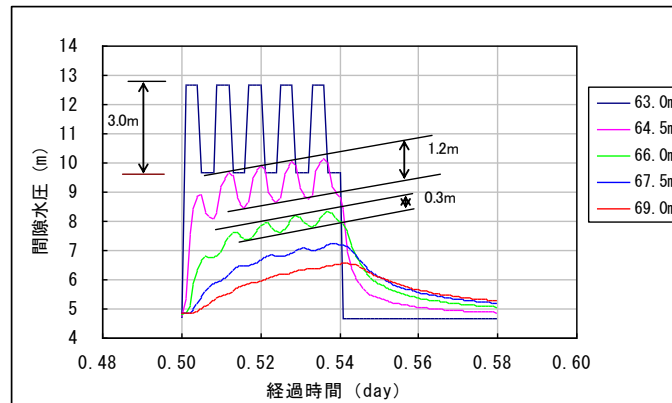


図 5-25 周期による減衰の比較

ビット圧変動である短周期（12 分）の振幅 0.03MPa による影響は、切羽からの距離 1.5 m 地点（64.5m のグラフ）では 0.012MPa 程度、3.0m 地点（66m のグラフ）では 0.003MPa 程度となっており、それより遠方では振幅はほとんどなくなっている。

さらに、切羽とマシン外周からの長周期（120 分）の振幅 0.05MPa の変動についてみると、1.5m 地点では、（64.5m ピンク）グラフの下端の値によると 0.54 日で 0.0881MPa（初期値 0.0465MPa からは 0.0416MPa 増）程度となっている。また、6.0m 地点（69.0 m 赤）では、0.0655MPa（初期値 0.0465MPa からは 0.0190MPa 増）程度である。

以上のことから、短周期の変動は長周期の変動に比較して減衰が大きいことがわかる。すなわち現場の地山での計測点はマシン外周から 2m 以上離れた位置にあることから、カッターディスクの回転によるビット圧の変動は離隔による減衰が急激であることから間隙水圧の変動としてほとんど検知されないことが確認できる。

また、位相遅れについては、解析ステップが 0.001 日（1.44 分）であり、細かい分析は困難であり、また解析においての荷重はパルス形状としており、波形が正弦波等でないことから厳密な検討はできないが、短周期の遅れはそれほど大きくなく、長周期については 6.0m 地点（赤丸）で 15 分程度と推定できる。

(7) 一次元の理論解と三次元解析の対比

上記では泥土圧シールドの施工による地盤中の間隙水圧の変化をシミュレートするため、三次元浸透流解析を試みたが、強制排水圧力の周期的な変動による影響について概ね把握できた。ここでは、さらに、その検証のために、間隙水圧伝播に関する一次元の理論解を用いて、岩佐⁹⁾が示した「海岸付近の地下水の潮汐による変動問題」を援用して検討

を試みる (図 5-26)。

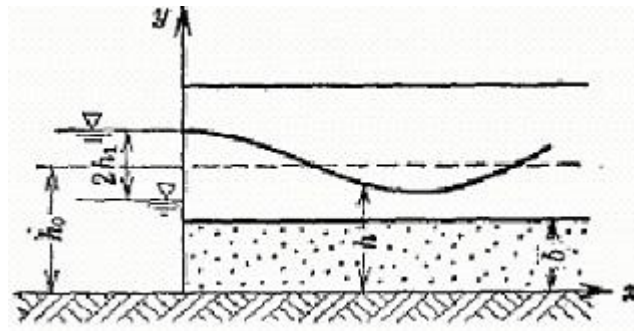


図 5-26 海岸付近の地下水位変動

下記の式(5.5～5.7)より潮汐の変動(周期的な変動)による浸透層内の地下水位の振動が与えられ、波高減少、位相変化が論じられることが示されている。

$$h = h_0 + h_1 \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{t_0} \left(t - x \sqrt{\frac{t_0 S}{4\pi T}}\right)\right) \quad (5.5)$$

距離 X での振幅 (h_1 からの減衰)

$$h(x) = h_1 e^{-x \sqrt{\frac{\pi S}{\alpha t_0}}} \quad (5.6)$$

位相

$$\delta = x \sqrt{\frac{t_0}{4\pi \alpha}} \quad (5.7)$$

ここで

S : 貯留係数 (帯水層の圧縮率 : κ)

T : 透水量係数(浸透量係数 : 透水係数 : k)

$$\alpha = T/S$$

α : 伝達率 k/κ (k : 透水係数, κ : 帯水層の圧縮率)

FEM 浸透流解析では $k = 0.864 \text{ m/day}$, $\kappa = 0.001 \text{ m}^{-1}$ としているので $\alpha = 864 \text{ m}^2/\text{day}$

t_0 : 周期

h_1 : 境界での振幅, X は境界からの距離

この条件下では、式 (5.6) および式 (5.7) はそれぞれ式 (5.8)、式 (5.9) のとおりとなり、ここで試みた解析における排水変動すなわち、12 分サイクル (1 時間に 5 サイクル) の 0.03 MPa の圧力変動については、 1.5 m 先では、 0.011 MPa 程度に低下し、位相は 2 分程度となる。この結果は、5.2.7 の (6) で示した三次元浸透流解析結果と概ね一致するものと考えられる。

$$h(1.5) = 0.03 \times \exp\left(-1.5 \sqrt{\frac{\pi}{864 \times (12/1440)}}\right) = 0.0111 \text{MPa} \quad (5.8)$$

$$\delta = 1.5 \sqrt{\frac{12/1440}{4\pi \times 864}} = 1.314 \times 10^{-3} \text{day} = 1.89 \text{min} \quad (5.9)$$

また、排水圧の変動を考慮しない場合として解析した当初の解析結果を、1 時間掘進の掘進中に 0.05MPa の定圧排水を行い、その後 1 時間停止を繰り返す変動と解釈して、理論解を試算すると、120 分サイクルの 0.05MPa の切羽圧変動は 1.5m 先では、0.0365MPa となり、位相は 6 分程度となる。

同様に、上記数式により、排出間隙水の変動サイクルが異なる場合の、地山中への伝播減衰について、離隔距離毎の計算結果を図 5-27 と図 5-28 に示す。

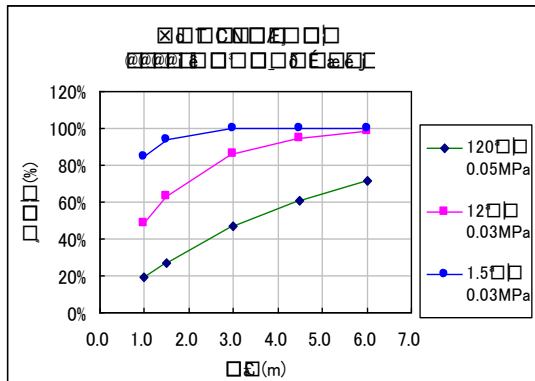


図 5-27 周期別 減衰率

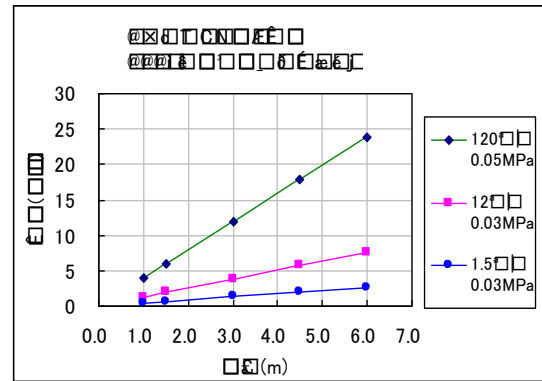


図 5-28 周期別 位相

掘進中の余剰水排出圧力の変動が地山の間隙水圧に与える影響について、計測データ及び三次元解析と一次元理論解による検討を行った結果、ビット圧の変動が計測間隙水圧の変動としてほとんど計測されないことについて次のことが判明した。

- ① 周期が変動する水圧による地山への浸透に伴い発生する過剰間隙水圧の振幅の距離減衰は、短周期の場合には大きく、長周期の場合は小さい。
- ② 三次元解析では、短周期をみると切羽から $x=3.0\text{m}$ より遠方では振幅はほとんどなくなっており、位相差は 5 分程度であり、概ね一次元理論解とほぼ同様な結果となっている。
- ③ しかし、計測結果 (図 5-11, 図 5-12) によると、切羽部での静水圧約 0.045MPa から約 0.013MPa の上昇は、切羽から約 80m 遠方においても、約 30 分の位相で約 0.002MPa の変動であり約 15% 程度に減衰した変動の伝播が計測されている。
- ④ したがって、推力ビット圧・カッター回転・攪拌・添加材注入等による「排出余剰水の圧力変動」は、「概ね 1 分以下の短周期」であることから、「掘進時の定格圧

力に比較して、変動する圧力の程度はさほど大きいものでない」ものと推測されるときともに、地山への浸透に際して減衰が大きいことから、その変動がほぼ計測されないのではないものと推測される。

しかしながら、解析や理論値の条件は、施工や荷重の設定の条件とは相異があること、また地盤の物性や異方性などにより、変化することから、更なる分析が必要と考えられる。

5.2.8 まとめ

浸透流解析による地山内間隙水圧変動過程のシミュレーション結果から、次のことが明らかになった。

- (1) 切羽における地山への圧力水の排出と排出の停止は、地山への圧力水の浸透による地山内間隙水圧の上昇と低下の変動を発生させること
- (2) このときの圧力水圧の変動は、掘進、掘進停止に伴う比較的長い周期的な変動の場合は、切羽遠方まで周期的な変動として伝搬するが、掘進中に発生するような短周期的な変動は切羽から短い距離で減水してしまうこと
- (3) (1), (2) から帯水砂質地盤における土圧式シールド掘進時には、シールド側から地山への圧力水の排出が生じ、その圧力水の地山への浸透により地山内間隙水圧が変動すると言えること

力に比較して、変動する圧力の程度はさほど大きいものでない」ものと推測されるときともに、地山への浸透に際して減衰が大きいことから、その変動がほぼ計測されないのではないものと推測される。

しかしながら、解析や理論値の条件は、施工や荷重の設定の条件とは相異があること、また地盤の物性や異方性などにより、変化することから、更なる分析が必要と考えられる。

5.2.8 まとめ

浸透流解析による地山内間隙水圧変動過程のシミュレーション結果から、次のことが明らかになった。

- (1) 切羽における地山への圧力水の排出と排出の停止は、地山への圧力水の浸透による地山内間隙水圧の上昇と低下の変動を発生させること
- (2) このときの圧力水圧の変動は、掘進、掘進停止に伴う比較的長い周期的な変動の場合は、切羽遠方まで周期的な変動として伝搬するが、掘進中に発生するような短周期的な変動は切羽から短い距離で減水してしまうこと
- (3) (1), (2) から帯水砂質地盤における土圧式シールド掘進時には、シールド側から地山への圧力水の排出が生じ、その圧力水の地山への浸透により地山内間隙水圧が変動すると言えること

5.3 泥土化のプロセスと添加材の性質による泥土の性状

第4章では、土圧式シールドに特有の泥土とその性質、さらに、泥土の形成過程である泥土化について概要を述べた。また、第4章で示したシールドの掘進、停止中の地山挙動に対する影響はシールド側から地山に及ぼされる力学的作用と密接な関係にあり、その力学的作用は主として、泥土圧とビット圧による作用であることがわかった。さらに、地山挙動発生メカニズムには、泥土圧、ビット圧、添加材注入圧などの作用が地山に対して全応力的な作用となることが鍵であることを推論することにより、泥土の性質に起因する泥土圧の地山への作用が全応力的な作用であることの意味とできあがった泥土そのものの性質の解明が重要であることもわかった。

このような泥土の特性はもともとの掘削土が持つ特性とは異なることから、掘削土に添加材を注入して攪拌混合して形成される泥土化のプロセスとその泥土の性質を特徴づける添加材の性質の解明が重要となることは論を待たない。ここでは、この泥土化のプロセスおよび添加材の性質と土圧式シールドの泥土として備えるべき性質について考察する。

5.3.1 泥土化のプロセスと添加材の役割

泥土化については、第4章において、地山の切削土が添加材の注入攪拌によって、切削土の土粒子同士が互いに接触状態になり、地山にある状態では土粒子同士の間隙を埋めていた間隙水が変わって、添加材が間隙を埋める構造になることであると述べた。

しかしながら、この泥土化は切削土砂が添加材との攪拌混合によって出来あがるものであり、攪拌混合が足りない切羽近傍のチャンバー内では、さらに、連続的に新しい切削土が取りこまれ、添加材が注入されることから、このような良質な組成の泥土が形成されないことは容易に想定される。したがって、泥土化のプロセスとは、切羽では、連続的な新しい切削土の取り込みと添加材注入が行われ、切羽の進行とこれに応じて行われる排土によって、チャンバー内の切削土砂と添加材の混合物が攪拌混合を繰り返されてチャンバー後部に移動し、泥土が形成されていく過程ということができる。また、このプロセスは推進力を受けて泥土自身が持つ泥土圧下で進む過程であることから、添加材を注入して泥土化を行う砂質地山の泥土化では、泥土化の初期の段階で地山に含まれていた間隙水と泥土化に使われなかった添加材の余剰水が切羽部分に集まり、地山に排出されていくことが必要である。これらのプロセスが順調に達成されない場合に、最適な泥土の形成が行えないことになる。

帯水砂質土の泥土化のプロセスを整理すると、次のようになる。

- ① せん断抵抗性のある土粒子構造骨格を持った砂質土が、切削によって構造骨格の一部が壊されて、移動可能な間隙水が土粒子の構造骨格から離れる。
- ② 添加材が注入され、構造骨格を形成する土粒子、吸着水、自由水、添加材が混じり合

った混合水状態になる。

- ③ 加圧下での攪拌混合が行われる。ここで、土粒子の構造骨格はさらに壊され、どんどん小さくなり、吸着水を持った土粒子構造骨格か、ばらばらになった土粒子の回りを自由水と添加材が取り囲む状態になる。
- ④ シールド掘進に伴い、吸着水を持った土粒子と添加材の混合物は、チャンバーの奥に進み、自由水は切羽側に集まってくる。
- ⑤ 切羽側に集まった自由水は、泥土圧によって地山側に排出される。
- ⑥ これらのことが、掘進中、泥土圧下で連続的に行われる泥土化のプロセスである。

この過程をチャンバー内の連続的な泥土の構造変化として模式的に表すと、図 5-29 のようになる。

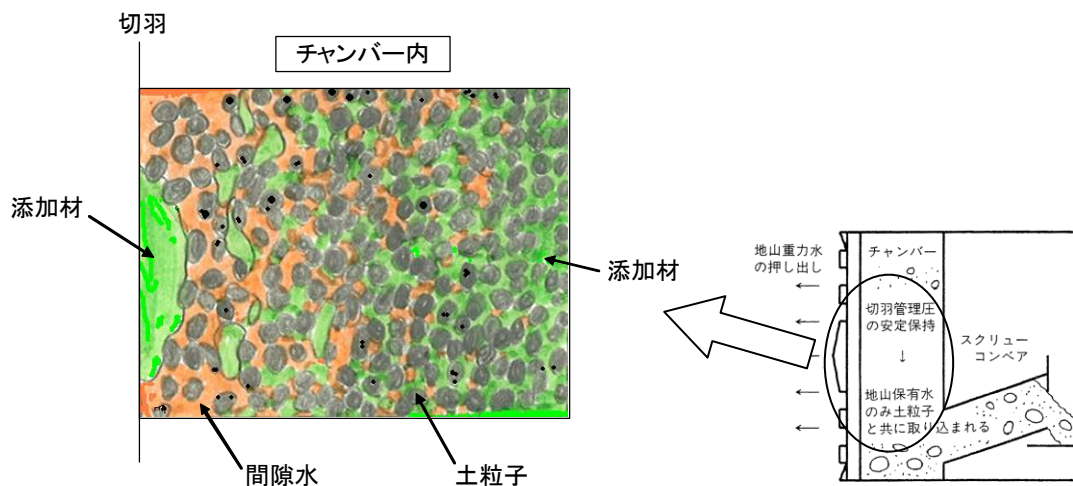


図 5-29 チャンバー内の泥土の構造変化

このプロセスの中で、土粒子の構造骨格が破壊されてばらばらになることで、実質的に泥土の間隙は地山状態よりは大きくなり、その大きくなった間隙を添加材が埋めることになるので、地山によっては、もとの地山の間隙率と泥土の間隙率に相違が当然生じる。このような場合は、地山の間隙水量よりも大きな添加材量が必要となる。

一方、地山が緩い砂質土の場合には、加圧下の連続的な攪拌混合という泥土化のプロセスから、泥土と地山の間隙率に大きな相違は考えられない。緩い砂質土で地山の間隙水量を超えた多量の添加材注入を行うと、添加材に浮かんた土粒子からなる泥土ができあがることにもなりかねない。しかし、このような泥土でも、その程度によっては、泥土として許容される性質として掘進に支障のない状態になることもあるが、一般的には、分離しやすく、水の浸入を許しやすく、止水性の低下など問題を引き起こしやすい。

ここで、完全に添加材と地山の間隙水が置き換わっていない状態でスクリーコンベアから排出される場合には、泥土は、流動性が大きく止水性能が劣る性状を示す。一方、土粒子同士が強い接触状態のままであれば、流動性に劣る泥土となり、チャンバー内の閉塞やカッタートルクが大きくなるなどの現象が現れる。しかしながら、泥土が加圧状態にあ

ることから、流動性が大きく、止水性が劣る泥土でも掘進に直ちに支障しない性状の範囲があり、一方、流動性に劣る泥土でもシールド機の性能が十分であれば、掘進に大きく支障しない範囲がある。したがって、実際のシールド掘進に適した泥土の性状としては、泥土の加圧状態、シールド機の性能によって一定の範囲を持っていると考えられる。

図 5-29 に示した良質な泥土形成が行われると、泥土は土粒子と添加材から構成されることになる。

この構成では、土粒子同士はあまり動力伝達に寄与しないと考えられることから、良質な泥土であればあるほど接触状態にある土粒子間を埋める添加材の性質が重要となるものと推定される。さらに、第4章で示した、掘進停止時の泥土圧低下の要因が泥土そのものの物理特性が関係していることも考えられることから、添加材の性質が重要となってくる。また、多量の添加材と土粒子で構成され、添加材中に土粒子が浮遊した状態の泥土の場合には、一層添加材そのものの特性が泥土の特性を決めることになるのは当然と言える。さらに、推進力の作用を受けて発生する泥土圧の性質と地山への作用の仕方についても泥土のこのような組成における添加材の性質の重要性が予見されることから、次項以降において、このような組成の泥土の特性について考察し、泥土として良好な性質を示すのに必要な添加材の性質を考える。

5.3.2 泥土の物理特性から見た掘進停止時の泥土圧作用の変化

(1) 泥土の機能と特性

4.3.2 で示したように、土圧式シールドを円滑に施工するために、泥土には次の3つの機能が期待される。

- 1-① 切羽を有効に支保する
- 1-② 切削土砂を容易に取り込める
- 1-③ スムーズに排土できる

このような泥土に求められる機能について、良好な施工がなされた多くの施工実績から物理的な指標を交えて、その具体的性質の面から整理すると、次の7つの特性として表すことができる。

- 2-① 回転するスポーク裏などの隙間への良好な充填性と流動性
- 2-② 低い透水性
- 2-③ 低いせん断抵抗
- 2-④ 地山と同程度の単位体積重量
- 2-⑤ 地山と同程度の含水量
- 2-⑥ 圧縮性が小さい
- 2-⑦ 水の影響を受けにくく、土粒子と水が分離しにくい

このうち、2-①～2-③までは加圧状態での、2-④と 2-⑤は大気圧状態での特性であり、

2-⑥と2-⑦は、加圧、大気圧両状態での特性である。これらの特性についての適性の程度を定量的に把握できる可能性がある方途を下記に示す。

2-①：カッタートルク値、アジテータトルク値、スクリュコンベアへの取込率など（回転数と排土量）

2-②、2-③：排土後の加圧透水試験、せん断試験

2-③：攪拌翼への土圧計の設置等

2-④、2-⑤：排土物性の測定

2-⑥：添加材および地山土砂による試作泥土の圧縮試験

2-⑦：加圧水下での土粒子と水の分離試験、脱水試験

いずれにしても、同類の物性を有する地質において使用されて、適切な施工が実施された添加材の種類、添加材率および上記の試験計測等の事例もあわせて、指標とすることが重要である。

(2) 掘進停止に伴う泥土圧の低下挙動と泥土特性

第4章の図 4-37 で示した掘進停止に伴う泥土圧の低下挙動に関して、材料特性から推測すると、次の2つの材料特性に類似する概念が考えられる。

(a) 塑性流動体（ビンガム流体）としての類似概念^{2),3)}

(b) 粘性体としての類似概念

以下では、これらの材料特性の概念をもとに、掘進から停止に至る泥土圧の低下について、そのメカニズムの視点から考察する。

泥土は粘性の高い添加材が土粒子間の空隙を埋めた構造であり、強い粘性特性があるものと考えられ、泥土からの水の分離が想定しにくいことやその他の物理化学的变化による泥土性状の変化も考えにくいことから、一般の粘性の性質を有する材料同様に、掘進停止による推進力の消失という急激な外力変化に対して、弾性的な短時間の応力低下と時間遅れに伴う低下の2段階の応力低下が発生する可能性がある。

その第一段階の圧力低下が掘進停止直後の泥土圧の急激な低下である。そして、その後、泥土の粘性特性の影響で、引き続きゆっくりとした泥土圧の低下が生じる。この過程では、切羽面において泥土圧と地山からの応力（地山の間隙水圧＋土圧）が等しい状態が維持されるか、あるいは、その状態に移行しようとする変化が生じていると推察される。

(a) 塑性流動体としての類似概念

掘削土に高分子等の添加材を注入して、更に混練することにより、泥土の塑性流動化が図られるが、一般にポリマー溶液、アスファルト、潤滑グリースのような分子構造の複雑な液体または半固体物質には、ニュートンの式に従わないことがあり、このような流体は非ニュートン流体と称される。

ニュートン流体は、加えられるせん断応力と速度勾配が比例するが、ある降伏値を超え

る応力が加えられるまで流動性を示さない物質がある。このような性質を持つ物質をビンガム塑性体と称される。これは、物質が持つ網目構造に起因する現象で、物質が流動性を示す前に構造が破壊される。

非ニュートン流体において、「せん断応力～せん断速度」の関係で生じる物性差の概念は図 5-30 で示される。

この概念は、掘削土に添加材を注入して、チャンバー内でカッターに取りつけられた可動攪拌棒と隔壁部の固定攪拌棒により動的に攪拌・混練されるとともに、一方では、掘進速度に応じるジャッキ推力により、所要の圧力状態に保持されることに伴い塑性流動化が図られることになり、(1)で述べた不透水性と流動性の両方の性質を持った泥土の性状の概念に通じるところがあるものと考えられる。

また、一定のせん断応力に達するまでは流動（変形）を示さないことから、流動が生じた掘進状態から停止に至ると、せん断速度はゼロとなるものの、せん断応力は直ちにゼロとならないことから、一定の短い時間において残留していたせん断応力が急速に低下するものと推測すると、泥土圧の低下につながることとなり、泥土の性状をたどることができる。またチャンバー内に取り込んだ掘削土の攪拌による挙動について、ビンガム流体として取り扱うことにより、混練の経時変化を解析する試みもなされている⁴⁾。

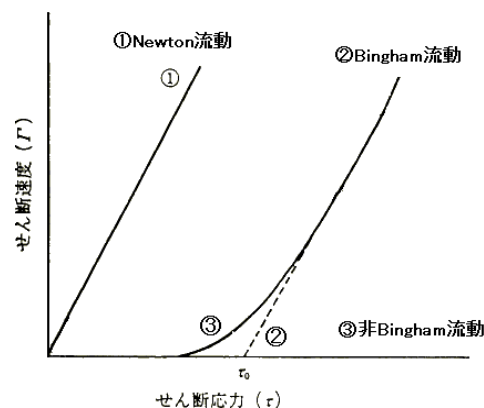


図 5-30 流動挙動の型

(b) 粘性体としての類似概念

一方、物質の構造の変形を伴う流動現象の一つとして、ダイレイタンシー性がある。ダイレイタンシー性とは、もともと変形により体積の増加を示す物質が流動性を低下させる現象と言える。例えば、均一球形粒子が密に充填されているとき、せん断により生じる流動は球同士の隙間を押し広げながら流出する。このため、流体の体積は膨張し、見かけ上は物質の粘度が上昇する。

この考え方は、近年ではせん断速度の増加によって粘度が上昇するような非ニュートン流動に対しても拡張して使用されるようになってきている。

したがって、ダイレイタンシーは本来の体積の増加を伴うような現象のみではなく、広

くはせん断速度の増加によって粘度が上昇する現象を表現するものである。

すなわち、固体粒子のせん断力が増加すると、粘度が増加する現象であり、粒子が高密度に充填されている状態に、せん断を加えると粒子同士がすべりあって分離し、粒子全体の占める空間が大きくなる。空間の液体は不十分となるために、流動しにくくなり、これは湿った砂などに見られる。

泥土化にあてはめると、加圧攪拌によるせん断力の増加に伴い土粒子の占める空間が大きくなり、土粒子間の空隙を満たす間隙水圧が不十分となり流動しにくくなるが、添加材が注入され、間隙水を排除して自ら置き換わってこの空間を埋めることにより、流動性が確保されるとともに、不透水性が確保されることになるとの考え方ができる。

(c) 粘弾塑性体の概念による応力の変化

ア) 泥土の体積（ひずみ）変化と泥土圧の経時変化について

掘進と停止におけるチャンバー内泥土の挙動と作用力を勘案すると、泥土を構成する掘削土の土粒子骨格と掘削土の空隙に充填された添加材が粘弾性的性状を有するものと想定することもできる。その作用力の状態変化に伴うひずみの時間変動は図 5-31 に示す推移が推測される。なお、ここでは推力には、ジャッキ総推進力・切削力（ビット圧）・泥土圧・添加材圧を含むものとする。

一方、チャンバー内泥土が体積ひずみを生じた場合に、粘弾性的性状に起因した応力状態の経時変化についても泥土圧の変化として示すと図 5-32 のように推測される。この変化は、第4章で示した帯水性地盤の施工におけるチャンバー内泥土圧の計測値の経時変化の形態に結びつくものと考えられる。

上述の考え方を踏まえて、土粒子及びその空隙に置換した添加材により構成される泥土の特性については次のように考えられる。

泥土の構造は図 5-31 に示す Maxwell モデル、Voigt モデルによる粘弾性特性を有した泥土固体の組成を想定した。その前提は、掘進中の推力等による圧縮に伴う応力の増加と掘進停止に伴う推力の消滅による膨張に伴う応力の低下が、泥土圧の内部構造の変化として、掘進と停止に伴う泥土の応力変動の一部を生じさせている可能性があるとの観点である。

図 5-31 に用いた記号の意味を次に示す。

E1：土粒子構造系の弾性ばね

$\eta 1$ ：土粒子の構造系が示す粘性ダッシュポット

E2：添加材の弾性ばね

$\eta 2$ ：添加材の粘性ダッシュポット

この構造モデルでは、E1、 $\eta 1$ で代表される土粒子構造系の特性と E2、 $\eta 2$ で表される添加材の構造特性が泥土の特性を決めているが、土粒子構造系のばねは、排土と攪拌混合によるダイレイタンスーの状況に依存し、ダッシュポットは添加材の空隙間の移動特性に依存するものと考えられる。

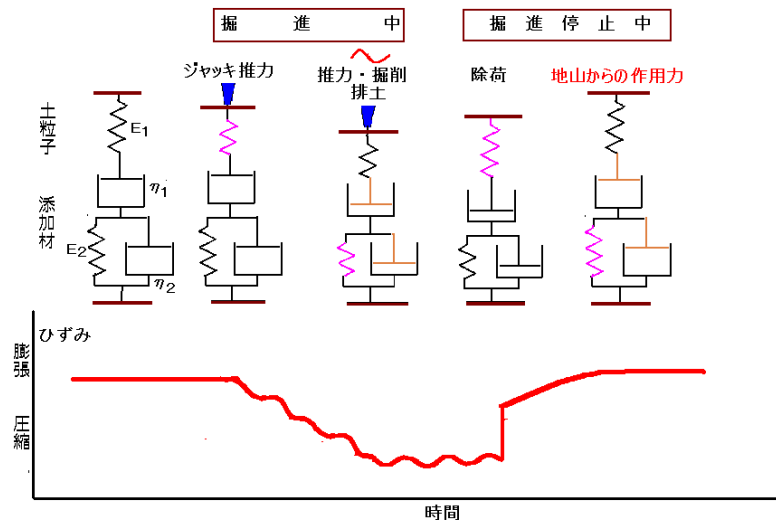


図 5-31 泥土のひずみの経時変化 概念図

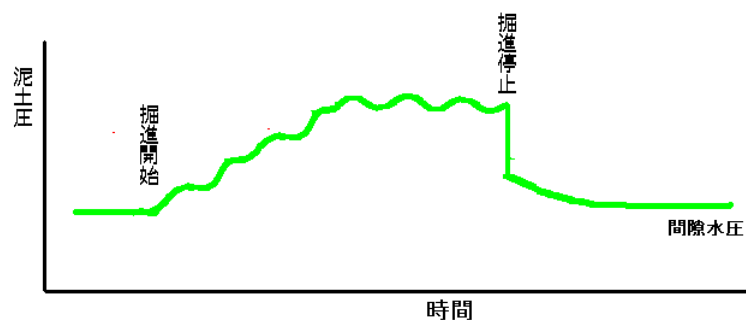


図 5-32 泥土圧の経時変化 概念図

イ) 泥土の構造組成と特性に関する推論

泥土は、掘進時に示す塑性・粘性特性の実態から、ビンガム流体的挙動を示す固体であり、掘進から停止に至る作用力の載荷・除荷に伴う圧力変化の計測結果から、「粘弾性挙動」を示す特性を有するものと考えられるが、その性状は、チャンバー内での「塑性流動化」の程度や状況は、掘削土と添加材の適合性・攪拌混合の程度に加えて、泥土への加圧の程度及び地山からの土水圧とのバランスにより変化するものである。さらにいうならば、同一地盤で同種添加材を用いたとしても、圧力設定値の管理、排土量制御により変化するものと考えられる。

また、添加材の構造特性は添加剤そのものの特性と考えられることから、一定の排土、一定の攪拌混合条件下では、泥土が図 4-19 に示す状態にあるものとする、泥土の特性に占める添加材の特性の重要性は明らかである。

さらに、掘進の停止は土粒子構造系の変化を起こす排土とダイレイタンスーを生じさせる攪拌混合の停止であることから、泥土圧の低下挙動は添加材の性質によって決まると言っても過言でない。したがって、泥土圧の掘進停止後の低下を防止するとの観点から添加

材の特性を考えると、添加材には圧縮性が小さく、粘性の高い（間隙間の移動を起こしにくい）材料が求められることになる。この添加材に求められる特性は、(1)で示した泥土の備えるべき特性の2-②、2-⑥、2-⑦に合致するものであり、7つの特性の中の他の特性との調和を考慮すると、特に、圧縮性の小さい材料が添加材に求められることになると思われる。

このような特性は、飽和軟弱粘土を攪拌混合してできる泥土が載荷、除荷時に示す難透水性の材料として有効応力の原理に従う短期的な特性とも矛盾するものではない。

泥土は、施工の時間経緯とともに、

添加材注入・掘削土取込→混練→泥土化・並行して一部泥土の排出

の過程で塑性流動化が図られるものであることから、上記の弾性ばね・粘性ダッシュポットの各係数は、刻々と変化するものであると捉える必要がある。すなわち、塑性流動化した良質な泥土を排出して、全く塑性流動化していない地山土を取込む作業の繰り返しである。

したがって、このような構造特性を有すると考えられる泥土によるシールド施工においては、刻々と物性が変化する泥土をいかに安定した良質な泥土としての質を維持しながら掘進を進め、停止中においては、その質の低下を極力抑止することが必要であると考えられる。

5.3.3 全応力的な泥土圧を作用させる泥土と飽和軟弱粘性土から作られる泥土 (泥土が有効応力と間隙水圧の両方に対して一体として作用するメカニズム)

泥土が、5.3.2(1)で示した3つの機能を持ち、7つの特性を持つことから、泥土が地山に対してどのような作用を及ぼし、逆に、地山や推進力の作用に対してどのような反応を示すかについて推察する。

「切羽を有効に支保する」という点が泥土圧を地山に作用させる場合の特性であり、「掘削土砂を容易に取り込める」「スムーズに排土できる」という泥土の機能は、「隙間への良好な充填性と流動性」「低いせん断抵抗」という特性に起因して発揮されるものと考えられる。「泥土が持つ圧力が切羽を有効に支保する」ということは、言い換えれば、泥土が持つ圧力がロスなく地山に作用することであり、掘進中の加圧状態でも泥土としての構造変化等による圧力損失がないということになると考えられる。「低い透水性」の材料は、泥土が透水性の地山の材料と接しているときでも、自身の内圧による泥土からの水の搾り出しも少なく、泥土の構造変化も生じにくい材料と言え、「隙間への良好な充填性と流動性」を有した材料は、切羽の各部分に満遍なくその圧力を及ぼす材料ということができる。さらに、接している地山に対しては、持っている圧力のすべてが作用することであり、すなわち、土粒子の構造骨格に作用する圧力と間隙水圧に作用する圧力に分かれて作用するものでないという意味で、第4章で述べた全応力的な作用をすると考える。

一方、外力の作用に対しても、「低い透水性」の土質材料は、一時的に上昇した間隙水圧で外力作用に抵抗する。そして、その上昇した間隙水圧の消散速度が遅いことで体積変

化を起こすのに時間を要する過程を経て外力に対応する特性を有しているものと考えられる。このような自身の持つ圧力の作用と外力の作用に対する反応に関する特性は、軟弱粘土を攪拌・混合して作られる泥土の短期的な特性と捉えることができる。

ここでは、まず、泥土としての機能を十分に果たす材料として攪拌・混合された軟弱粘土を挙げて、泥土が持つ圧力の外荷重として作用する場合の特性と外荷重の作用に対する反応特性について考える。

(1) 土水一体の特性と飽和軟弱粘土

工学的に飽和粘土を扱う場合、粘土は土水一体の材料として取り扱うことが多い。ここで言う土水一体の特性とは、外力として作用する場合も外力に対して反応する場合も、短期的には、土圧と水圧が分離できない状態で一体的な挙動を示す性質を言う。

飽和粘土においては、一般に、短期的な外力としての作用や反作用に関する取り扱いをする場合には、土水一体の材料とは、外部に対して作用する場合には、土圧+水圧=全応力が一体的に外部に作用すること、また、外力に対しては、短期的には非圧縮性体のように反応する特性を持つ材料ということができる。

軟弱な飽和粘性土は、もともと低い透水性あるいは、不透水性に近い材料である。攪拌混合により、大きな鋭敏比を持つ特性から高流動性を持つようになる。このような練り返し状態の粘性土も低い透水性の材料であり、一般の粘性土と同様に有効応力の原理に従った挙動を示すものの、短期的な外力変化に対しては、前述のいわゆる土水圧一体の挙動を示すと見なされている。

(2) 添加材注入が泥土化に必要な地盤の場合（砂・砂礫層の場合）

このような地盤における泥土化のメカニズムには、添加材の性質および土粒子と添加材との混合状況が大きく影響していると考えられる。良質な泥土は、図 4-19 に示したように、ちょうど、土粒子同士が接触状態のまま添加材で満たされた空隙に浸っているような状態と考えられる。したがって、土粒子から構成される構造骨格の変形、すなわち有効応力の状態は、空隙を埋めている添加材の性質に依存することになる。

しかしながら、土粒子の空隙を埋めている添加材は、粘性が大きく、泥土が持つ圧力程度に加圧されても簡単には空隙から外に出て行かないと考えられる。その反面、添加材で空隙が埋められている泥土では、軟弱粘土からなる泥土が、空隙が非圧縮性の水で満たされているのとは異なり、水よりは圧縮性の大きい材料で満たされていることから、外力作用時に軟弱粘土からなる泥土が瞬間的には非圧縮性体のような反応を示すのに対して、5.3.2 で考察したように、添加材部分に弾性変形が生じるものと推定される。さらに、加圧状態が継続的に続けば、軟弱粘土では空隙水が外部に出て行くことによって内部の有効応力状態が変化すると同様に、砂質土や砂礫土に添加材を用いて作った泥土でも、添加材の粘性特性に応じてさらに弾性変形が生じ、内部の有効応力状態が次第に変化していく

ものと考えられる。

以上のように、添加材注入によって作られた泥土では、短期的な外力作用に対しては、添加材の特性に応じて、軟弱粘土からなる泥土に比べて小さめの剛性で反応するものの、時間経過に伴う反応としては、軟弱粘土からなる泥土と同じような特性を有しているものとみなせる。

一方、泥土が持つ圧力の外部に対する作用という点では、添加材を用いて作った泥土も透水性が低い材料であり、外部に対しては、全圧力が満遍なく作用し、その大きさも泥土の中で土粒子部分と添加材部分に分離されて地山に作用するものではなく、一体として、「全応力的」に作用することになり、この作用状態も土水一体の特性を持っているということができる。したがって、泥土の性質のうち、5.3.2(1)で示した 2-②、2-③、2-⑥、2-⑦の特性が、この土水一体の特性を示すのに欠くことのできない特性であると考えられる。

以上のことから、泥土が示す地山に対する圧力の作用メカニズムは、いわゆる土水一体の作用メカニズムということができ、反対に、掘進停止に伴い推進力が消失して除荷状態の発生による内部圧力の低下特性は、泥土および添加材の物理特性の面からは、主として、添加材の材料特性に起因するものであると言える。

ものと考えられる。

以上のように、添加材注入によって作られた泥土では、短期的な外力作用に対しては、添加材の特性に応じて、軟弱粘土からなる泥土に比べて小さめの剛性で反応するものの、時間経過に伴う反応としては、軟弱粘土からなる泥土と同じような特性を有しているものとみなせる。

一方、泥土が持つ圧力の外部に対する作用という点では、添加材を用いて作った泥土も透水性が低い材料であり、外部に対しては、全圧力が満遍なく作用し、その大きさも泥土の中で土粒子部分と添加材部分に分離されて地山に作用するものではなく、一体として、「全応力的」に作用することになり、この作用状態も土水一体の特性を持っているということができる。したがって、泥土の性質のうち、5.3.2(1)で示した 2-②、2-③、2-⑥、2-⑦の特性が、この土水一体の特性を示すのに欠くことのできない特性であると考えられる。

以上のことから、泥土が示す地山に対する圧力の作用メカニズムは、いわゆる土水一体の作用メカニズムということができ、反対に、掘進停止に伴い推進力が消失して除荷状態の発生による内部圧力の低下特性は、泥土および添加材の物理特性の面からは、主として、添加材の材料特性に起因するものであると言える。

5.4 掘進停止後の地山から受ける圧力低下に連動した泥土圧の低下

5.3.2 において、掘進停止に伴う急激な低下以降の泥土圧の低下が添加材の特性に起因して発生すると考えられることを示した。しかしながら、一方では、第4章で述べたように、掘進停止に伴って泥土圧の源となる推進力の消失が生じて泥土圧が他の外力の作用に対して受動的な圧力に変化していることも予想される。

本節では、地質と施工条件が異なる2箇所の施工事例において、掘進停止後の泥土圧の低下傾向が異なる挙動を示した計測事例をもとに、泥土圧低下のメカニズムを検討する。検討に用いるデータは、瀬古T（上飯田工区）と常磐道Tでの計測結果である。

5.4.1 瀬古T（上飯田工区）における計測結果

地山の間隙水圧の計測は、第4章図4-22に示す位置で行った。

図5-33～図5-37には掘進時と停止時のチャンバー内泥土圧と地山間隙水圧の経時変化の計測値を示す。ここでは、ジャッキ総推力は掘進時のみ記録されており、掘進終了後のセグメント組み立てに伴う部分的なジャッキの解放・再加圧については、記録されていない。したがって、掘進停止中のセグメント組み立てに伴うジャッキ操作により、泥土圧等が変動する可能性があるが、ジャッキ操作がなされた場合には、ピッチング等のマシンの「停止状態での動き」が生じることから、操作の有無の確認を必要とする場合には、それらのデータの記録の照合により行うことができる（図5-37）。

図5-33～図5-37から、掘進停止時の泥土圧と間隙水圧の変動が確認される。

掘進停止に伴い過剰間隙水圧が浸透消散するが、その経時変化の計測による曲線（ピンク色）を泥土圧の計測低下曲線（緑色）との相異の有無は図5-37をもとに作成した図5-38から考察できる。

図中の赤の曲線は、間隙水圧の変化曲線を泥土圧の低下がほぼ収束する位置で一致させることにより、減少傾向の差異を検出したものである。

なお、計測データの計測鉛直方向位置の高さは、泥土（左）は天端－3.58m、泥土（中）は天端－0.78m、間隙水圧は天端－2.15mの位置にあり、位置による絶対値に差が生じる。

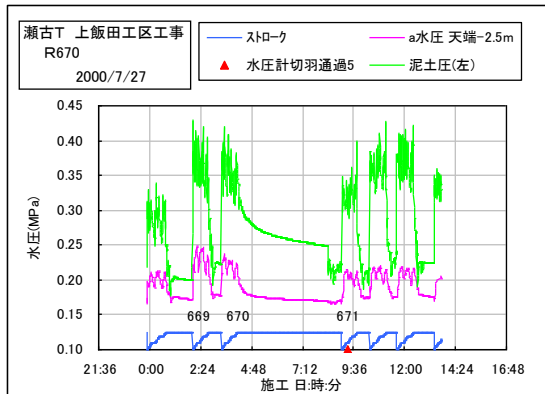


図 5-33 地山間隙水圧と泥土圧の変動(1)

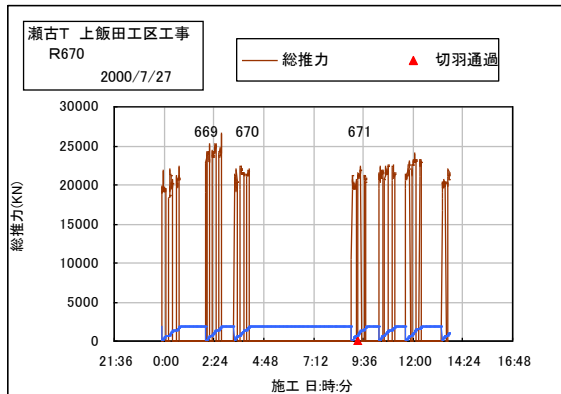


図 5-34 総推力の変動

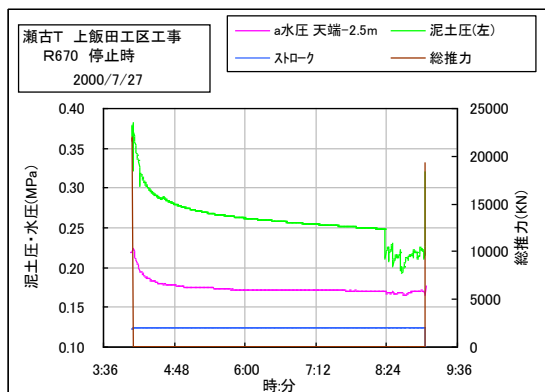


図 5-35 地山間隙水圧と泥土圧の変動(2)
(掘進から再発進まで)

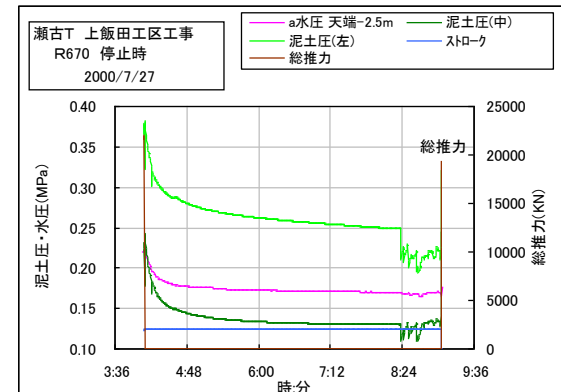


図 5-36 地山間隙水圧と泥土圧の変動(3)
(停止後再発進まで(停止中))

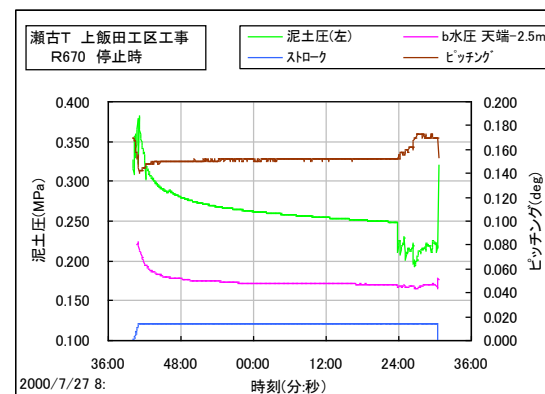


図 5-37 地山間隙水圧と泥土圧の変動(4)
(ピッチングの影響)

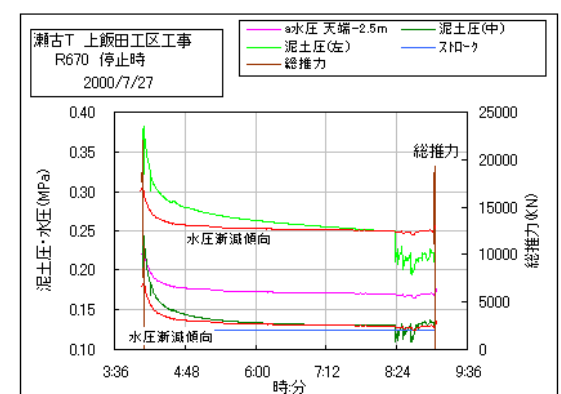


図 5-38 地山間隙水圧と泥土圧との
低下傾向の比較

掘進の停止により、泥土圧は間隙水圧のみを作用力として受動すると仮定すると、泥土圧もほぼ赤色曲線に沿って低下し、静水圧に漸近するものと推測されるが、緑と赤の低下形態に差異が生じているとともに、概ね収束している計測値を比較すると、泥土(左)と間隙水圧には、約 0.075MPa ($0.250-0.175$) の差が生じており、計測位置の高さの差圧約 0.014MPa を考慮しても、「位置水頭の差による差異」のみとは考えられない数値とな

っている。

この原因は次のように推定される。

- ① 泥土圧には、間隙水圧以外に、地山応力が作用力しており、更に間隙水圧低下とともに地山応力も変化することから、泥土圧低下曲線は間隙水圧低下と一致しない。
- ② 掘進時の推進力の停止により、チャンバー容積は一定で停止するが、添加材で間隙が置換され塑性流動化した泥土圧には主として、添加材の特性に起因する除荷による「体積変化」があり、この泥土の構造特性により、間隙水圧の受動と相まって、漸減傾向（応力低下の曲線曲率）が異なる。
- ③ なお、ここでは、設定泥土圧は、地盤が約 10cm 以上の玉石が卓越しており、先行シールドの通過後に、約 3m の離隔を持って後行シールドを施工することから、静止土圧+静水圧を基本とするとともに、チャンバー内上位の泥土圧計（中）で管理されており、かなり高めの圧力管理により施工されていたことの影響も考えられる。

5.4.2 常磐道 T における計測結果

常磐道 T での計測結果は、図 4-3 に示す位置での測定から得られた。図 5-39～図 5-46 には、そこで得られた泥土圧、間隙水圧の経時変化のスケールを変えて示した。

ほとんどの施工において、停止中には添加材注入により泥土圧の保持が図られているが、ここでは泥土圧保持がなされていないリングについて比較する。

図 5-44 に示すとおり、泥土圧と間隙水圧は極めて類似した低下傾向を示している。なお、低下の収束過程において、セグメント組み立てのためにジャッキ操作がなされたことから、マシンに若干の動き（ピッチング）があり、これに伴い泥土圧の変動が記録されている。しかしながら、この影響は間隙水圧に対しては微小なものであることが同図からわかる。このことは、停止中は第4章で述べたいわゆる「余剰水の地山への排出」が無いことから、地山の間隙水圧が上昇せず、掘削中に発生した過剰間隙水圧の浸透消散が継続しているものと考えられる。

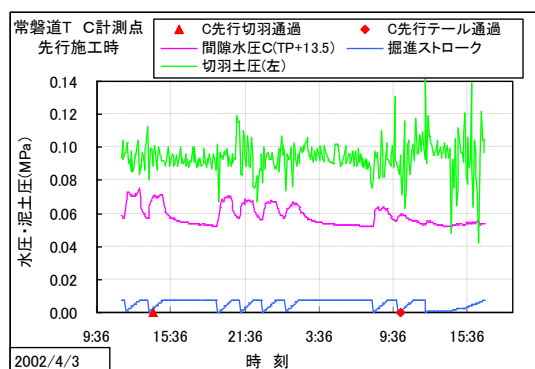


図 5-39 地山間隙水圧と泥土圧の変動(1)
(先行シールド施工時)

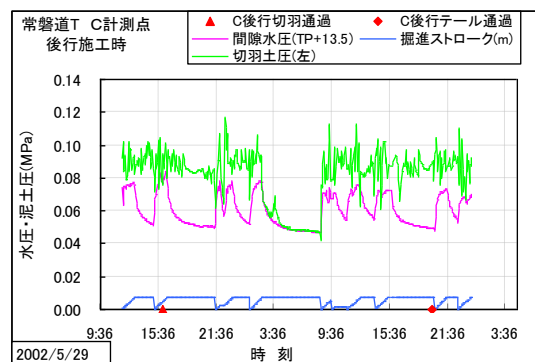


図 5-40 地山間隙水圧と泥土圧の変動(2)
(後行シールド施工時)

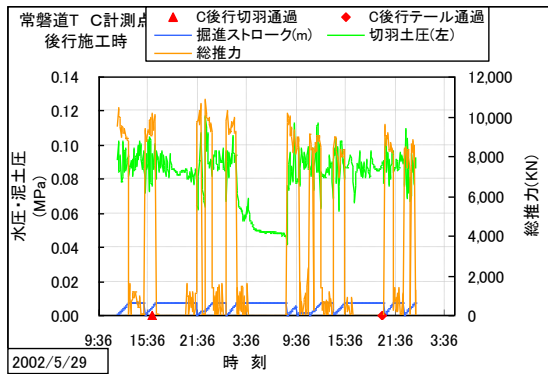


図 5-41 総推力と泥土圧の変動(1)

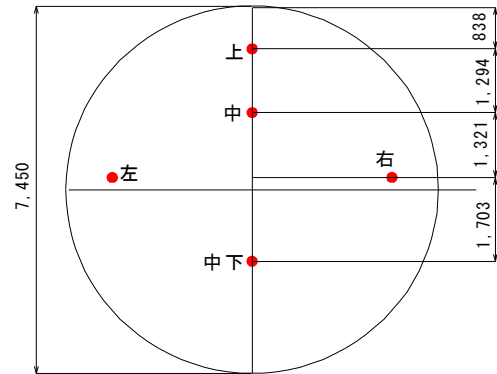


図 5-42 土圧計設置位置

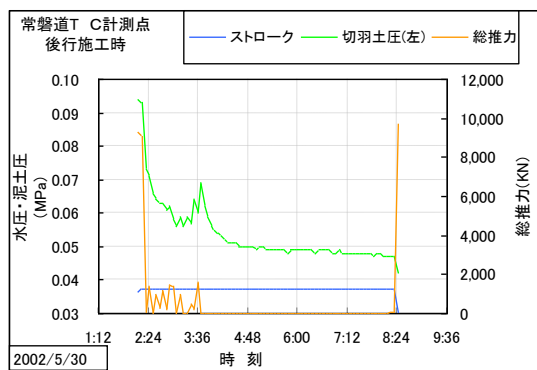


図 5-43 総推力と泥土圧の変動(2)

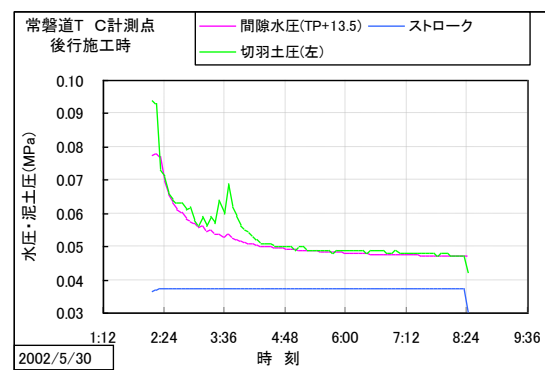


図 5-44 地山間隙水圧と泥土圧の変動(3)

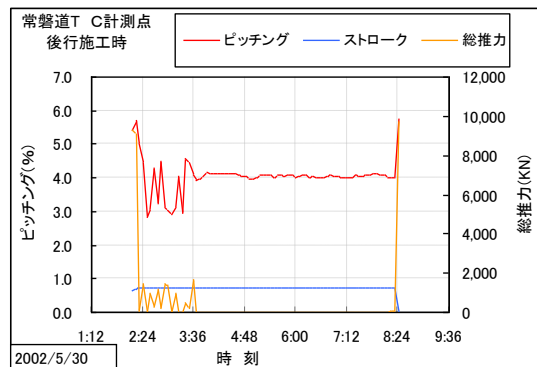


図 5-45 ジャッキ操作による
ピッチングの修正

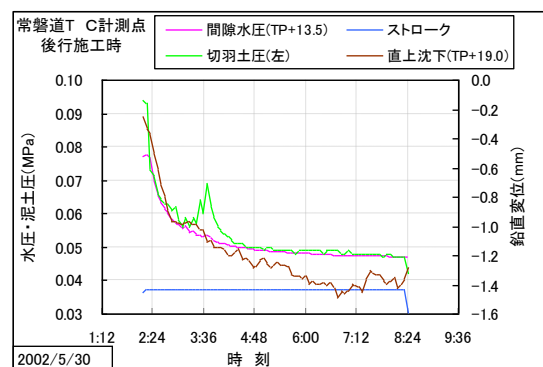


図 5-46 地山間隙水圧、泥土圧変動
と地山変位の関係

一方、ピッチングの影響により変動した泥土圧は、マシンの動きの停止と共に、再び低下が始まり、間隙水圧に漸近して収束にいたっている。このことから、図 5-44 に示した泥土圧と地山間隙水圧の低下傾向はマシンの動きに伴うチャンバー容積の変化を受けて圧力が変動した泥土は、一定の「落ち着き」(応力緩和)が生じた後、間隙水圧の作用に従い間隙水圧に収束したものと考えられる。

瀬古 T（上飯田工区）と常磐道 T の計測結果に基づき分析した結果を整理すると次のようになる。

- ① 一般的には、掘進の停止により、泥土圧は間隙水圧の作用力を受ける受動的な圧力に変わる。
- ② 砂質地盤で掘進停止中の数時間の自立性が維持される場合においては、泥土圧の低下は、ほぼ間隙水圧の低下と一致することになる。

常磐道 T ではこのメカニズムに一致するものの、瀬古 T ではこのメカニズムとは異なった結果が得られている。

この原因としては、まず、瀬古 T 上飯田工区では、水圧以外の土圧の作用は払拭できないものの、泥土化のプロセスの達成度の相違、あるいは、添加材（SP バインダーと KT ゲル）の材質の相違により泥土の除荷による特性が異なることが考えられる。さらに、掘進停止前の泥土圧の大きさの相違で除荷重の大きさが異なること、瀬古 T 上飯田工区の泥土圧変化に対する間隙水圧変動の反応が鈍いという地山透水係数の相違に起因する特性と添加材の相違と泥土化のプロセスの完成度の相違に起因する泥土の物理特性の相違も影響して停止後の泥土圧の応力低下が緩慢であったと推定される。

以上のことから、掘進停止に伴う泥土圧の長期的な低下は、泥土圧が掘進停止に伴い地山からの圧力に対して受動的に発生する圧力に変わることによって、外力としての地山間隙水圧や土圧の変化による影響と、推進力の消失による除荷に伴う泥土自身の物理特性が示す挙動の複合した挙動と考えられる。したがって、この挙動には、地山の自立性や間隙水圧の消散速度に関係する地盤特性に加え、5.3.2 と 5.3.3 で述べた添加剤の性質が重要な役割を果たすものと考えられる。

5.5 結論

本章では、第4章で推論した地山挙動メカニズムの根拠とすべく、次の4点について分析、考察を行った。

- ① 地山への水の排出とそれによる地山間隙水圧の上昇について
- ② 泥土化のプロセスと泥土の物理特性
- ③ 泥土の土水一体作用のメカニズム
- ④ 掘進停止後の泥土圧低下の要因

この結果、次の（１）から（５）に示す結論を得た。

- （１） 土圧式シールド掘進時に発生していた地山間隙水圧の上昇は、シールド側から地山への圧力水の排出が原因であり、圧力水が、地山内に浸透していくことにより発生すること
- （２） 泥土に適切な性質を与えるためには、掘削土に含まれる間隙水を排除し、土粒子同士を接触状態にして、その間隙を添加材で埋める構造の泥土を作ることが重要であり、そのための泥土化のプロセスを確実に実行することが大切である。
- （３） 泥土がその機能を発揮するためには、地山に対しては、土水一体の作用を及ぼすことが大切であり、その特性を有する泥土を作ることが重要である。
- （４） 泥土の特性に占める添加材の性質の果たす役割は極めて大きく、掘進停止に伴う泥土圧の低下を抑えるために添加材に求められる特性は圧縮性が小さく、粘性が高いことである。
- （５） 掘進停止に伴う泥土圧の長期的な低下は、掘進停止に伴い推進力が消失することで泥土圧が地山から間隙水圧や土圧を受けて発生する地山に対する受動的な圧力に変わることにより起因する挙動と、泥土圧が除荷されることにより示す物理特性に起因する挙動の両方が複合した挙動であり、ここでも、泥土化に使われる添加材の性質が重要な要素となる。

参考文献

- 1) 岩佐義朗 著：水理学，朝倉土木学講座 3
- 2) 梅田慎也，辻正哲，澤本武博，佐藤伸好：練混ぜ抵抗を用いたワーカビリティ評価方法，土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，Vol 55，pp168～169，2000
- 3) 松川正樹，荻原能男，石川裕司：ビンガム流体の物性値，土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，Vol 49，pp388～389，1994
- 4) 清水賀之，佐々木加津也，東恵美子，柳浩敏，西田昭二，吉川忠男：トンネル掘削機解析技術，日立造船技報第57巻第2号，1996

第6章 シールド切羽における応力バランスと地山挙動のメカニズム

6.1 はじめに

第4章および第5章における泥土圧シールド施工と地山挙動の考察によって、シールド掘進に伴う切羽周辺地山の挙動が、地山の掘削、シールド掘進に伴う泥土を媒体とした推進力の作用、添加材の注入など、各種施工要因の地山に対する力学的作用に対する地山の有効応力の原理と浸透現象によって生じるものであるという推論を得た。この推論の重要な点は、切羽におけるシールド側から地山への全応力の作用とそれに伴って変化する切羽地山の応力状態が、有効応力の原理と土中水の周辺地山への浸透によって有効応力が変化していくという点にある。したがって、この過程を切羽地山や周辺地山の有効応力の原理に従う応力変化として検討することにより明らかにすることが、この推論の妥当性について理論付けの役割を果たすものと考えている。

切羽地山の応力状態の変化と地中水の移動が周辺地山の応力状態の変化を発生させ、その変化は結果として、地山内の間隙水圧の変化と地山変位を発生させることから、まず、シールド施工に伴うシールド側から作用する全応力の変化とこれに伴う切羽地山の全応力変化を明らかにする必要がある。次に、この切羽地山の変化した全応力状態を有効応力と間隙水圧の和として表示し、切羽地山と周辺地山の間隙水圧の相違から地山内で生ずる有効応力状態の変化を明らかにすることで、第4章で確認された諸現象のメカニズムを説明し、推論の適合性を示すこととする。

本章では、泥土圧シールドによる施工を、(1) 地山切削時（掘進中）と(2) 掘進停止中の2つに分け、切羽部で地山に直接接しているチャンバー内土砂（泥土）の性状に注目して、ビットによる地山の切削、チャンバー内への切削土砂の取り込み、添加材の注入という、シールドマシンによる掘進時の施工要素、シールドマシン推進停止並びに掘進停止中に行われるセグメント組立や泥土圧保持のために行われる添加材注入や推進力作用などの施工要素の地山への力学作用を明らかにする。次に、明らかにされた力学作用が及ぼされる地山条件を設定し、作用力とそれに釣り合う地山の有効応力状態の関係を、切羽におけるシールド側と地山側の応力バランスとして表示する。さらに、この応力バランスがシールド施工に従って変化する様子を、理想的な地山切削が行われた場合と一般の掘進の場合という2つの地山掘削状態に対して、検討位置（ビットの位置）と検討時期（初期応力状態、掘進時、停止時、停止中）、並びに、切羽地山とシールドの接触環境（余剰水の排出の有無）と時間経過に応じて考察することで泥土圧シールドの掘進管理にあたっての要点を述べる。最後にこの切羽における応力バランスの検討にしたがって瀬古 T（味鋤工区）で発生した地山陥没時の掘進管理状況を分析して、応力バランス検討の有効性を示す。

6.2 シールド掘進と地山挙動

シールド施工が地山に及ぼす影響を模式的に図示すると図 6-1 のように表すことができる。シールド施工においては、掘削と掘進停止・セグメント組立てが交互に行われてシールドマシンが前方に推進されることから、シールド施工時にシールド機側から地山に及ぼす作用として考えると、その作用は次の 7 つと仮定できる。

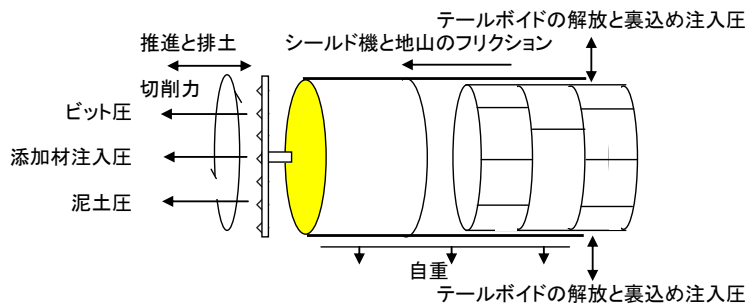


図 6-1 シールド側からの地山への作用力（イメージ）

- ①掘削（土砂の切削、取り込み）
- ②推進力の作用（ビット圧、泥土圧、シールドマシンと地山のフリクションによる摩擦力ほか）
- ③添加材注入圧の作用
- ④マシン下部地山へのマシン自重の作用（マシンに対する浮力との相殺分）
- ⑤テールボイドの解放
- ⑥裏込め注入圧の作用
- ⑦掘進の停止（作用の停止）

これらの作用のうち、④⑤⑥については、切羽におけるシールド側からの地山への作用でないことから、本章の対象としない。また、①は、地山掘削が切削ビットによって削り取られる理想的な掘削が行われる場合とビット圧等により地山が切削前に崩され、ゆるみが発生する一般的な場合で相異があると考えられ、①②③と⑦の作用はチャンバー内の泥土を介して、あるいは、切羽と泥土に接した状況での作用となる。したがって、これらの作用に対して泥土の性状や性質が大きな影響を及ぼすことは第 4 章、第 5 章で示したとおりである。また、②③および⑦の作用と掘削土の泥土化および泥土の性状とその特性との関係についても、第 5 章に詳述してあるが、掘削の作用と②③および⑦の作用の要点は以下のとおりである。

6.2.1 掘進中の地山に対する力学的作用

(1) 掘削

a) 理想的な地山掘削が行われている場合

掘削は、切羽においてシールド機に取り付けられたビットによって地山を削ぎ落とす作用と削ぎ落とした地山をチャンバー内に取り込む作用である。また、掘削と同時にチャンバー内の土砂はスクリーコンベヤーによってチャンバー下部から排出される。さらに、泥土圧シールドでは、この掘削と並行してシールド機の推進力が地山に作用する。

泥土圧シールド機の切削部は、カッタービットが取り付けられた 2～4 対の回転するカッタースポークから構成されており、その代表的な例は、図 6-2 に示すとおりである。また、地山を切削するビットが取り付けられたカッタースポークの代表的な状態は図 6-3 に、カッタービットによる切削状態の拡大図は図 6-4、ビットによる地山への切削力の作用状況は図 6-5 のように表される。

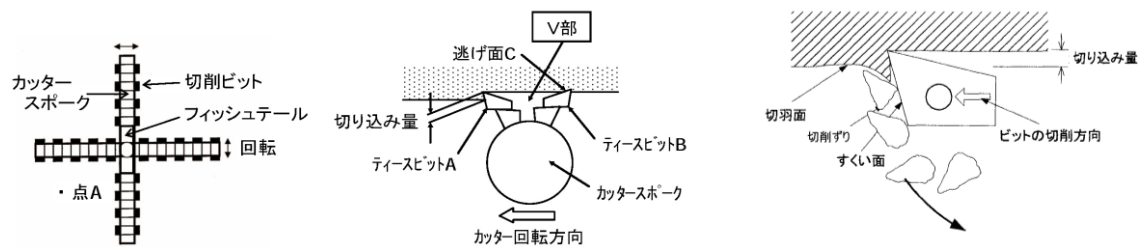


図 6-2 シールドカッター

図 6-3 カッタービット部

図 6-4 カッタービットによる切削状態の拡大図

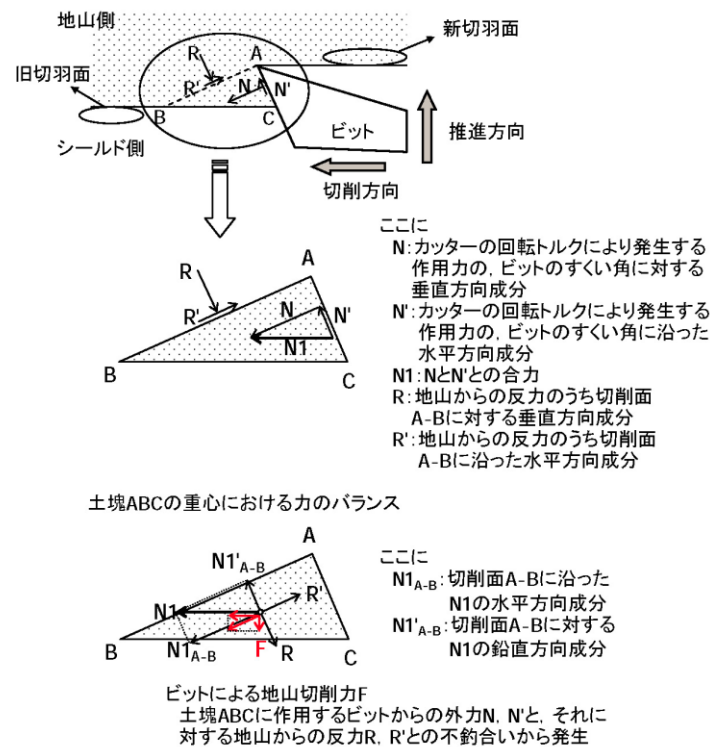


図 6-5 ビットによる地山への切削力の作用状況

地山を切削する作用は、一般に地山の全応力的な解放を意味するが、その作用は切羽におけるビット圧や泥土圧の作用下で行われる。したがって、理想的なビットによる切削が行われた場合には、地山切削に伴う地山の全応力的な解放は、切羽全体のうち地山が切削される部分（カッタースポークとビットのある部分）に限定され、そのほかの部分は依然として泥土圧が作用し続ける状態と考えられる。また、図 6-4 や図 6-5 に示すように、地山が切削される場所においては、地山が削ぎ落とされる部分はビット前面の極めて限定された区間であり、図中ではビットの食い込みが表現されていないが、実際にはその背後の部分では切削ビットが地山に食い込み、削ぎ落とされる地山部分の裏側に、ビット圧が作用していることになる。したがって、ビットの移動速度と地山の切削位置の関係を考えると、掘削による地山の全応力的な解放は極めて短時間であり、切羽全体を考えても、極めて小さなエリアに限定されているにすぎないと考えられる。この場合の切羽における添加材注入が無い場合のビット部切削環境をスポークの断面で表すと、図 6-6 のように考えられる。

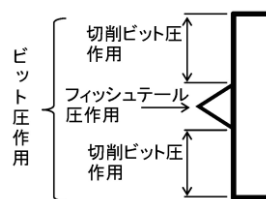


図 6-6 切羽における切削環境
(理想的な掘削の場合)

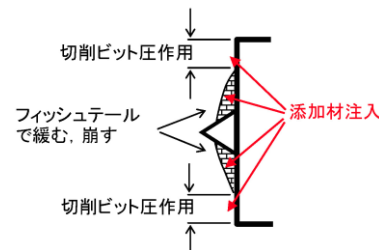


図 6-7 切羽における切削環境
(一般的な掘削の場合)

b) 一般の掘削の場合

しかしながら、一般的には、カッタースポークに取り付けられるビットは、掘削対象地盤に応じて図 6-3 とは異なった形状を示すものも多い。また、図 6-4、図 6-5 に示すようなビット形状による金属の切削を想定した地盤の切削とは異なり、ビットに加える力によって、地盤自体を圧壊させて崩すような掘削過程になっていることが考えられる。第 4 章でも示したように、通常の掘削が行われている場合には、このような地山の崩れやゆるみ（攪乱）が確認されており、地山とシールド機の切羽での切削環境は、シールド機の推進力や切削トルクで地山の一部分が崩され、緩んだ地山と添加材や地山の間隙水が混合した領域が泥土と新鮮な地山の間にあり、図 6-7 に示す状態になっていると考えられる。ここでは、ビットによる地山の切削というよりは、推進力やカッタースポークとフィッシュテールの回転トルクにより地山を崩したり、ゆるめて、その部分を払ってチャンバー内に取り込む作用が行われるとともに、この領域は、地山の切削、シールド機のビット圧や泥土圧、添加材注入圧などの作用で周辺地山よりは高い圧力状態になっているものの、その圧力は、概ね、泥土圧に等しいものと考えられる。

今後の考察では、これら a) と b) の2つの掘削状況を念頭において、まず、良好な泥土が形成されていることを前提として理想的な掘削状態を基本に考え、地盤自体の圧壊を伴う掘削過程を一般の掘削の場合として、理想的な掘削状態と対比する形で議論を進める。

(2) 推進力の作用

推進力は主に、ビット部分が切羽に食い込んで地山を切削するためのビット圧とチャンバー内の泥土を加圧して切羽面を抑える泥土圧、さらには、シールドマシンと地山のフリクションとして地山に作用する。ビット圧と泥土圧は、理想的な切削が行われる場合には、切羽面で地山に対して全応力として作用する。また、一般の掘削の場合には、ビット圧が直接切羽面で地山に作用するというよりは、一部がフィッシュテールなどによって地山を崩したり、緩めたりする力として作用し、他はその作用を通じて泥土圧と一緒に、切羽における(1)で述べた緩んだ地山や掘削土砂、添加材、地山の間隙水が混合した領域の圧力を上昇させることによって地山に作用するものとする。シールドマシン外殻と地山のフリクションは、地山に対して全応力的な作用というよりは直接的にせん断状態を発生させる作用をすると考えられるが、全せん断力は総推進力の20%程度であり、切羽に直接的に作用するものではなく、切羽前面の応力状態に大きな影響を及ぼすとは考えられないことから、ここでは検討の対象としない。さらに、掘進中、ビット圧や泥土圧にはカッターの回転方向やマシンの癖、地山性状などによる偏りや時間的な変動が発生し、その調整のために推進力が用いられるが、検討に当たっては、ビット圧や泥土圧の偏りや時間的な変動はないものとする。

(3) 添加材注入圧の作用

添加剤を水と混合して作った添加材は、切羽部においては、フィッシュテールやカッタースポーク部から泥土圧よりも大きな圧力で、しかも高い粘性を有した状態で噴出される。また、添加材は加圧下の切羽面と泥土の間に浸入していくことから、添加材注入の作用は地山側、チャンバー側に同じ大きさで注入時の圧力を有した流体圧として作用すると思う。

なお、掘進中の添加材注入は、バルクヘッドからも実施されることもあるが、理想的な掘削が行われる場合には、掘進中の地山への作用としては、切羽部とバルクヘッド部両方の添加材注入圧の作用を切羽部での添加材注入圧で代表させて考察する。また、一般の掘削の場合には、添加材注入圧は、切羽部における緩んだ地山や掘削土砂、既に注入した添加材や地山間隙水の混合した領域の圧力（最終段階には、この圧力にほぼ等しい泥土圧）を上昇させる作用として考える。

(4) 排土

掘進中に行われる排土は目標泥土圧を指標とし、掘削土量との比率について、地山性状

を勘案した排土量で地山へ悪影響を起こさないような管理がなされるが、実際には、泥土化のために添加材の注入が行われたり、泥土化の進行や、推進力の切羽への作用により、地山の掘削土量と添加材の注入量と排土量に一定の関係を維持した状態での掘進管理が行われる。

したがって、切羽に作用する泥土圧や掘進速度が一定の管理値を保つことに掘進管理の主眼が置かれ、両掘進管理項目をコントロールするために排土量を管理することが一般的である。掘進中においては泥土圧が管理範囲にあり、泥土圧に異常な変動を生じさせない状態で目標とする掘進速度が維持されるように排土量を管理することが一般的である。したがって、意図的に排土量を変動させる操作を行った場合や、施工と排土の開始と停止が正確にシンクロナイズされない場合には、泥土圧が排土の影響を大きく受ける場合も見られる。

以上のことから、本文の検討テーマである切羽における地山とシールドの応力バランスに対する検討にあたっては、排土の影響は直接泥土圧の変動に影響を与えることから、基本的には泥土圧の変動に含まれるものとして評価するものとする。

6.2.2 掘進停止中の地山に対する力学的作用

掘進停止中には、一般にセグメント組立てやマシンおよび坑内外の設備のメンテナンスが行われ、その時間は実掘進時間よりも長いのが普通である。この期間には、推進ジャッキの盛替え作業が行われ、盛り替えられない推進ジャッキはストロークを固定した状態になる。したがって、セグメントの位置調整のために小さなジャッキ圧を間欠的に用いる場合や推進ジャッキ盛替え時のストローク確保のためジャッキとセグメントの当たりをとる場合を除き推進力の作用は無くなる。一方、この間には、地山の切削も切削土砂のチャンバー内への取り込み、さらに排土も停止状態となる。

したがって、掘進の停止は、シールドの推進力の作用停止であり、その停止に応じてビット圧が解放され、泥土圧を発生させる機能が停止することになる。しかしながら、泥土圧は推進力の停止後もすぐには完全に解放されず、時間の経過に伴って低下するものの圧力を保持し続ける。その低下量や低下の時間特性は、第5章で示したように、主として地山応力状態の変化と添加材、泥土の特性に起因するものである。ここでは、掘進停止の地山への力学的作用を、①推進力の消失、②ビット圧の消失、③泥土圧の変動として扱うものとする。

一方、切羽に対する泥土圧の低下を防止したり、低下した泥土圧の回復のためにシールド機バルクヘッドやフィッシュテールやカッタースポークから添加材を注入したり、推進ジャッキを再加圧することも行われる。このような作用は、前述の推進力の作用や添加材注入圧の作用と同様の力学的作用を地山に対して及ぼすと考えられるが、この推進力や添加材注入圧が作用するときの切羽地山とシールド側の接触環境は理想的な地山切削が行

われる場合と一般の掘削の場合では異なることから、その影響を考慮する必要がある。

次節以降においては、6.2.1～6.2.2で述べたシールド側から地山への力学的作用をもとに、シールド施工に伴う切羽におけるシールド側と切羽地山の応力バランスの変化と地山挙動を考察する。

6.3 シールドからの作用と地山挙動の相互作用メカニズムに関する推論に対する考察

シールド機から地山に対しては図6-1に示した作用があり、泥土を介した推進力の地山への作用特性と添加材注入の地山への作用特性が分析され、シールド施工中の切羽とその前方では、それらの作用に対する地山挙動特性が確認されている。ここでは、このシールドから地山への作用と地山のリアクションを図6-8に示す事項としてとらえ、第4章で示したシールド掘進および掘進停止時のシールドの作用と地山の相互作用のメカニズムの推論を、切羽における応力バランスの変化とそれに伴う地山の有効応力状態の変化に基づいて考察する。

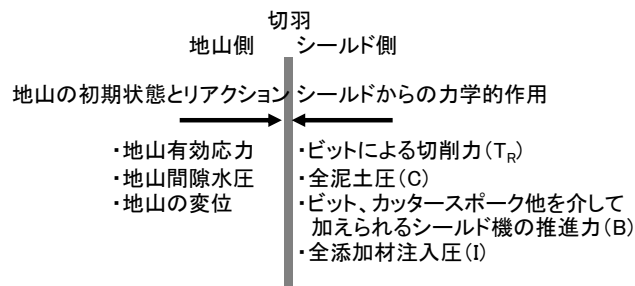


図6-8 切羽でのアクションとリアクション

6.3.1 切羽における応力状態検討にあたっての仮定

(1) 応力状態検討にあたっての条件

(a) 応力バランスの表示方法

応力バランスの表示は、次による。

- ① 切羽に垂直な方向のバランスを対象とする
- ② シールド側の応力変化は全応力変化として表し、地山側の全応力状態の変化は有効応力と間隙水圧の和として表す

(b) 地山応力状態の表示

地山応力状態は、初期地山応力状態を基準に、それに対してシールド側、地山側からの作用によって発生する変化分を加える表示とし、その応力状態が周辺地山との応力状態の相違やシールドと地山の接触環境に相違に応じて変化する過程を表示する。

(c) シールド側応力状態の表示

シールド側の応力状態としては、後述するシールド側からの作用力を応力表示する。応力の表示は各応力状態の検討位置、検討時期に対して、それぞれのシールドと地山の接触環境に応じて、シールド側の作用力の変化を応力変化として表示する。

(d) 応力バランスの検討時期

応力バランスの検討時期は、①初期応力状態、②シールド掘進時、③掘進停止時、④掘進停止中とする。なお、シールド掘進時には、切羽地山の対するシールド側からの作用力の作用順序を考慮した検討時期とする。

(e) 応力バランスの検討位置

応力バランスの検討位置は、検討時期の地山切削過程を考慮し、掘進時は、図6-9に示す①ビット前面、②ビット部、③ビット後面の3箇所とし、ビット部においては、図6-5に示すビットによって切削除去される旧切羽面と切削後現れる新切羽面に分けて検討することを基本に、掘進時、掘進停止時および掘進停止中には、切羽全体の平均的な状態を考え、特定の検討位置ではなく、切羽全面の平均位置を対象とした検討を行う。

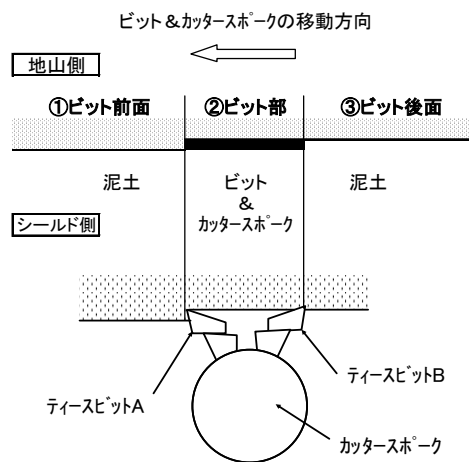


図 6-9 ビットによる切削部分の詳細

(f) 地山の掘削状況

地山の掘削状況としては、良好な泥土が形成されていることを前提に、切羽において切削ビットによる理想的な切削が行われる場合と一般の地山掘削状態の2つの状態について検討する。

(g) 地山特性

検討する地山特性は、十分に透水性が高い場合（帯水性砂質地盤等）を基本に、透水性が十分には高くない場合（粘土地盤等）も考察する。

(h) シールドと地山の接触環境

シールドと地山の接触環境としては、掘進中のように、地山に対してシールド側から排出する水が常に存在する環境と掘進停止中のように地山に対して排出する水が継続して存在しない環境に2つの環境を想定して検討する。

(2) 簡略化のための掘進中のシールドから地山への作用と地山応力状態についての仮定

以後の検討では、切羽面における地山側とシールド側の応力バランスの変化を、図 6-10 に示す表記方法を用いて、作用側であるシールド側の応力を右に、地山側を左に、その中間に地山とシールドの境界としての切羽位置を示す。

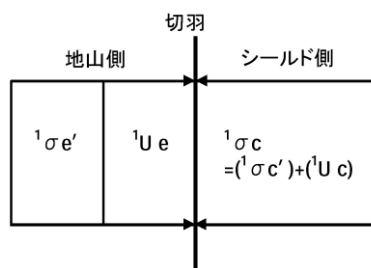


図 6-10 掘削開始前の切羽面での応力バランス表示

(a) シールドから地山への作用に関する仮定

泥土圧シールドの施工時に、シールド側から地山側に対して切羽面で作用する力は、図 6-8 で示したとおり、

- ①ビットによる地山切削力（ただし、切羽に垂直な成分は除く）： T_R
- ②地山を切除することによる切羽面内における地山の鉛直、水平方向の有効応力の解放力（ T_R から発生する成分）
- ③チャンバー内全泥土圧： C
- ④ビット、スポーク他を介して地山に加えられるシールド機の推進力： B
- ⑤全添加材注入圧： U_i
- ⑥地山切削時に土塊をチャンバー内に押し出す力： F

と考える。ただし、厳密な意味で B と T_R を区分することはできないが、いずれも、シールドマシンの推進力とカッタートルクにより地山に加えられる作用力であることから、 T_R はカッタートルクとして計測される力であり、地山切削に必要な力 B はシールドの総推力からシールド機と地山のフリクション、シールド機の機械的なロスおよびチャンバー内全泥土圧 C を除いたものとなる。地山切削時に土塊をチャンバー内に押し出す力 F は、図 6-5 に示すシールドマシンのカッタートルクとして計測される力からビットのすくい角と切削される土塊のせん断面 $A-B$ と切羽面 $B-C$ との成す角によって生まれる力である。全ビット圧は、前述した一般の掘削の場合のように、地山掘削時に切羽前方地山に崩れやゆる

みが発生し、ビット到達前に実質的に地山が切削されている場合には、ビット前面の緩んだ切羽部に生じる混合状態の泥土を介して地山に作用する力となる。

前述のように、切削機構を考えた切羽での応力バランスを議論する場合には切羽における作用力を個別の応力として考える。したがって、その応力は個々の作用力を切羽面積やビット部の面積で割った平均値として、 σ_F 、 σ_c 、 σ_B で表す。一方、切羽全体の応力バランスを議論する場合には上記の③、④、⑤の作用圧力を対象として考え、それぞれ、 σ_c 、 σ_B 、 U_i 、として表すことにする。今後の検討にあたっては、チャンバー内全泥土圧は $C = \sigma_c \cdot A$ 、全ビット圧は $B = \sigma_B \cdot A'$ で表す。ここに、 A は切羽の面積、 A' はビット部の面積である。

(b) 応力状態検討にあたっての仮定

切羽における応力状態の検討は、次の仮定に従うものとする。

①地山の応力状態は有効応力の原理に従い、地山の間隙水圧の変化は周辺地山とで発生する土中水の浸透によるものとする。

②シールド側から地山側への作用圧力は、次の3つを考える。

i) チャンバー内泥土圧： σ_c

ii) ビット圧： σ_B

iii) 添加材注入圧： U_i

③チャンバー内泥土圧は、第5章で示したように、実際の施工から、

i) 地山材料が軟弱粘土の場合は、添加材の注入を行わなくてもチャンバー内での攪拌混合により良好な泥土としての機能を果たすこと

ii) 掘進中は新たに切削された土砂を取り込み、攪拌混合して土砂と水が一体化した性状となった泥土としてチャンバー内に蓄えられ、その性状のまま排土されることから、良好な泥土としては、チャンバー内土砂が土と水に分離した構成となって挙動するとは考えにくいこと

iii) 加圧された良好な性状の泥土は難透水性の性状を示すことが確認されていることから、地山に対しては常に土水一体となった圧力を全応力として作用するものとする。

④掘進中は、チャンバー内泥土圧は一定で、常に、掘削開始前の地山の水平方向の全応力と同じ値とし、シールド側、地山側の有効応力と間隙水圧を

シールド側 : 全応力表示 ${}^n\sigma_c$
有効応力表示 $({}^n\sigma_c')$, $({}^nU_c)$

地山側 : 全応力表示 ${}^n\sigma_e$,
有効応力表示 ${}^n\sigma_e'$, nU_e

と表すものとする。ここに、添字の c はチャンバー、 e は地山を表し、 n はそれぞれの応力状態評価の時期と初期状態からの順序を示す。

⑤基本として考えるビットによる地山切削は、図 6-4、図 6-5 に示したような理想的な状態で行われるものとし、地山は、ビットによる切削が行われる前に、ビット圧等に

よって破壊されて緩んだり、崩れたりしないものとする。しかしながら、一般の掘削の場合のように、ビットによる切削が行われる前に地山が緩んだり、崩れたりした場合には、地山切削時にシールド側から作用する力としてビット圧が作用せず、泥土圧や添加材注入圧だけが作用することになることが考えられるが、第4章のビット圧の分析からも実際の施工においては、ビット圧が全く作用しないという状況は発生していないと考えられ、ビット圧のうち、直接地山の有効応力を増大させる成分の相対的な大きさが変化するだけで、推進力がビット圧と泥土圧として作用することによって変わらないことから、推進力が変わらなければ、全応力バランスに変わりがなく、それぞれの応力成分の絶対値に相異が発生するだけと考える。

(3) 地山の初期応力状態

地山中にあるシールドの幾何学的位置関係は図 6-11 (1) のようであり、地山側とシールドカッターの境界を切羽面としてシールド機が存在しない地山の初期状態での水平方向応力状態を記述すると図 6-11 (2) のようになる。ここで、地山内の点の地表面からの深さを h 、そこから地下水面の位置までの距離を h' とすると、この仮想の切羽面での水平方向の有効応力状態は、静止土圧状態と考えられ、模式的に図 6-12 のように表せる。また、このときの水平方向の有効応力 $\sigma h'$ は、地下水頭を h' 、土の単位体積重量を γ とし、鉛直方向の全応力、有効応力をそれぞれ σv 、 $\sigma v'$ 、水平方向を σh 、 $\sigma h'$ 、地山の間隙水圧を U で表すと、

$$\sigma v = \sigma v' + U$$

$$\sigma h = \sigma h' + U$$

$$\sigma v' = (\gamma - 1)h' + \gamma(h - h')$$

$$\sigma h' = K \sigma v'$$

で表され、 K は地中の鉛直方向と水平方向の有効応力の比となる。

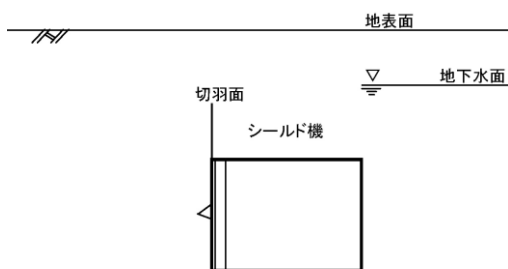


図 6-11 (1) シールドの幾何学的位置

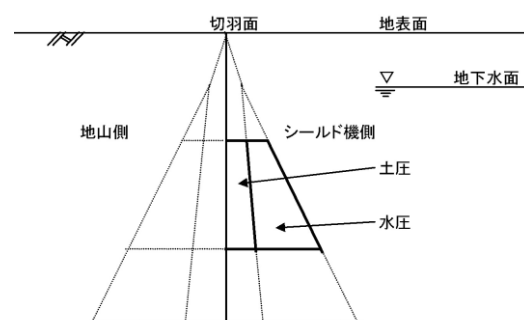


図 6-11 (2) 地山内水平方向応力バランス

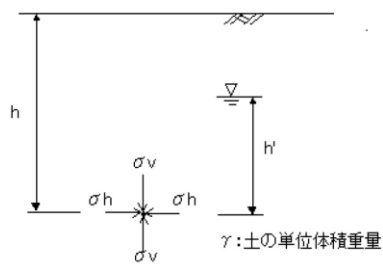


図 6-12(1) 掘削前の地山状態

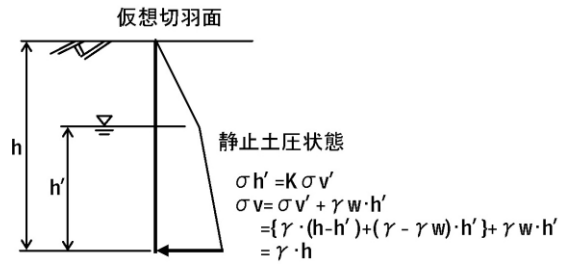


図 6-12(2) 仮想切羽面における静止土圧

(4) 掘削開始前の初期応力状態における応力バランス

(2)で述べた仮定に従い掘削開始前の地山内の仮想切羽面における地山側とシールド側の応力バランスについて考えてみる。シールド側では

$$\sigma_c = (\sigma_c') + (U_c)$$

となり、一方、地山側での有効応力および間隙水圧は、水平方向全応力 \$\sigma_e\$、水平方向有効応力 \$\sigma_e'\$、間隙水圧 \$U_e\$ とすると、

$$\sigma_e = \sigma_e' + U_e$$

となる。

したがって、初期応力状態としての記号を \$n=1\$ として¹で表すと、地山側の水平方向有効応力は¹\$\sigma_e'\$、間隙水圧は¹\$U_e\$ となり、この有効応力と間隙水圧に対して、チャンバー内泥土圧が水平方向の仮想有効応力(¹\$\sigma_c'\$)と仮想間隙水圧(¹\$U_c\$)として作用し、平衡している状態が初期応力状態となる。この状態を図示すると、模式的に図 6-10 のようになり、その状態を式で表すと、

$$\text{全応力 } {}^1\sigma_e = {}^1\sigma_e' + {}^1U_e = {}^1\sigma_c$$

$$\text{有効応力 } {}^1\sigma_e' = ({}^1\sigma_c')$$

$$\text{間隙水圧 } {}^1U_e = ({}^1U_c)$$

ここに、添字¹は初期状態を表す。

6.3.2 ビットによる理想的な地山切削時の局所的な応力バランス

(1) ビットによる切削

泥土圧シールド機の切羽の代表的な構造例を図 6-2 に示すとおりとし、カッタースポークが停止した状態で切羽面上の点 A において、シールド側から泥土圧が作用し、地山応力とシールド側からの作用圧力が全応力的に釣り合った状態にあると考えると、切羽における水平方向の全応力バランスは図 6-13 に示ようになる。

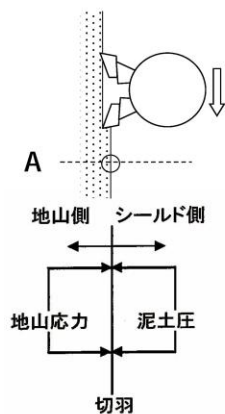


図 6-13 切羽におけるビット前面での
全応力バランス

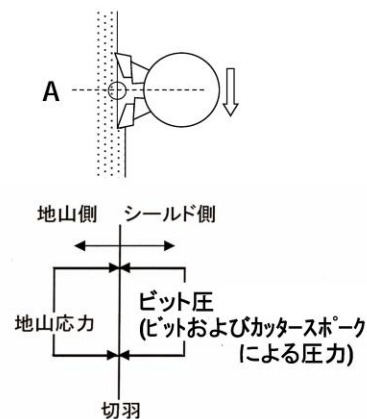


図 6-14 切羽におけるビット部での
全応力バランス

また、カッタースポークが A 点を通過する時には、6.2.1(1)で述べたように、シールド側からは地山を切削する切削ビットとスポークを介して地山に伝達されるビット圧が地山に作用して、地山応力とシールド側からの作用圧力が全応力的に釣り合った状態にあると考えられる。その状態は、図 6-14 のように表すことができる。ただし、ここで、図 6-13 の地山応力より図 6-14 の地山応力の方が数倍大きい。しかしながら、このビット圧の地山への作用は、地山切羽から少し離れたところでは、平均化される。常磐道 T の静止土圧＋水圧に合わせた泥土圧管理の場合には、平均化されたビット圧は土被り 4～7m の泥土圧の半分程度となる。

(2) ビットによる切削過程

ビットによる切削過程について、6.2.1(1)および6.3.2(1)の仮定をもとにしてビットの移動に伴う点 A の応力状態を図 6-9 に示したビット前面、ビット部、ビット後面の 3 つの部分に対して考えてみる。

まず、掘削が開始される前は初期応力状態であり、地山からの圧力とシールド側からの泥土圧が釣り合った状態（図 6-10）にあるものとする。掘削が始まりビットが近づいてくると図 6-9 の①ビット前面の位置関係となり、ビットで地山が切削される時は②ビット部、そしてビットが通り過ぎると③ビット後面の位置関係となり、位置関係の変化がカッタースポークの回転に伴って何度も繰り返されることになる。したがって、ビット切削による局所的な地山側とシールド側の応力バランスの変化を追跡することは、この①から③の位置関係にある場合（あるいは部分）の応力バランスを考え、この状態が順次移行してゆく過程を追跡することに帰着する。

ビットによる地山切削時の地山側とシールド側の全応力バランスの変化を、ビットと評価点の位置関係に応じて、①ビット前面、②ビット部、③ビット後面に分けて図示すると図 6-15 のようになる。ただし、ここでは、6.3.1 で仮定したように、チャンバー内の泥土

圧およびビット圧は全応力として示し、泥土圧は期間中一定と仮定する。以下に、それぞれの状態（部分）における応力バランスとその変化について示す。また、図中の○番号は、評価位置を示す。さらに、図中の②-1、②-1'は評価位置②で生じる2つの異なる評価位置を示す。以後の検討にあたっては、理想的な切削が行われる場合を基本とする。

①ビット前面

ビット前面では、次の2つの応力バランスが生じると想定される。

- 1) 切削の影響を全く受けない初期状態（図 6-15 の①）
- 2) ビットによる切削の影響を受けて地山が削ぎ落とされる段階、およびビットが評価位置に到達した状態（図 6-15 の②）

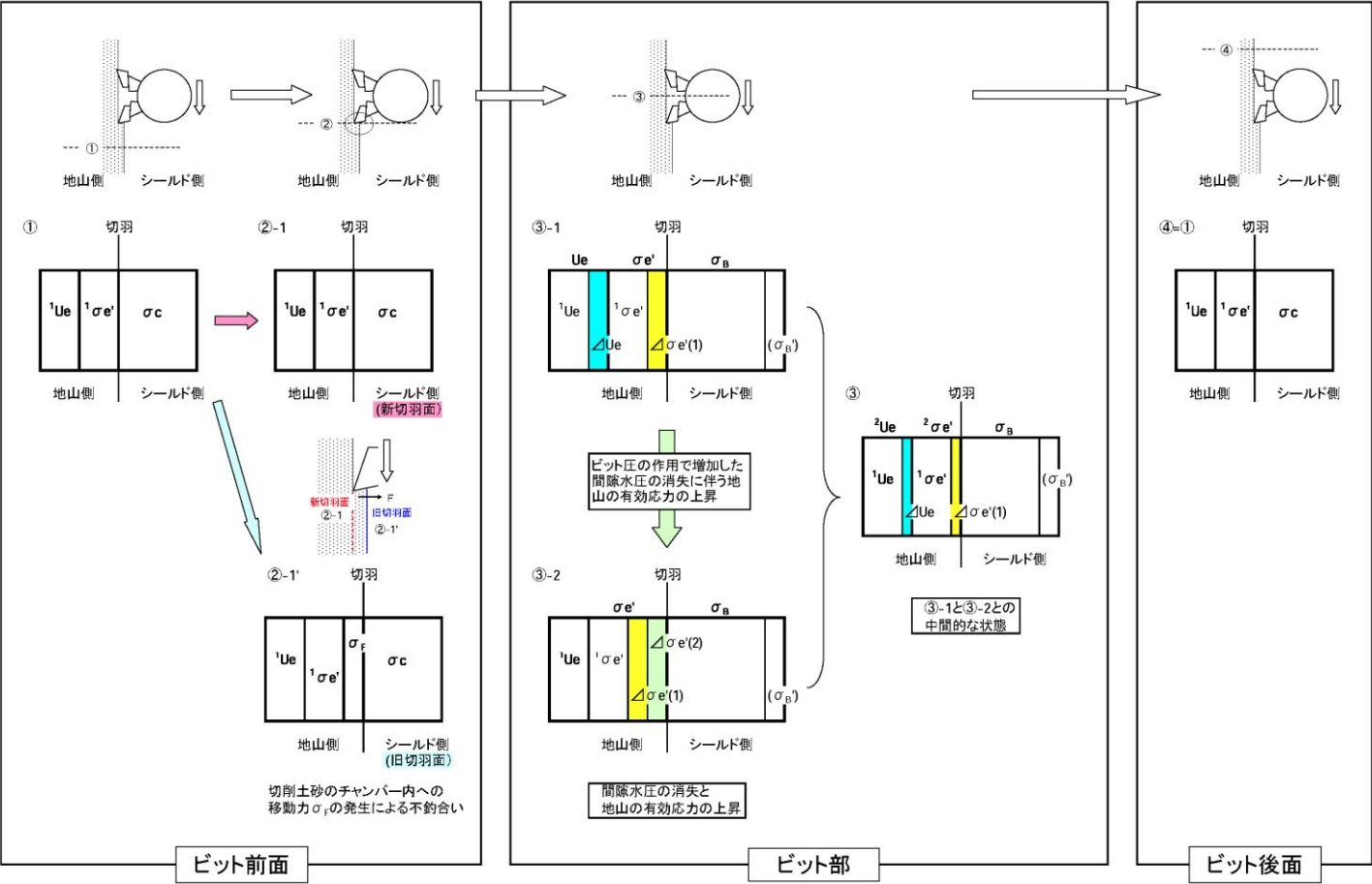
1) 切削の影響を全く受けない初期状態の応力バランス

この状態は、基本的に地山の初期状態と同じで、ビットが近づいてくる前にはチャンバーから地山に作用している泥土圧 σ_c （全応力表示）が地山応力 $(^1\sigma_e' + ^1U_e)$ と釣り合っている図 6-15 の①状態であるが、実際の状況において、同じ評価位置を追跡していく場合には、①ビット前面部、②ビット部、③ビット後面部が何度も通過していく間に、必ずしも、地山の初期応力状態と同じ状態ではなくなっていくと考えられる。

2) ビットによる切削の影響を受けて地山が削ぎ落とされる段階、およびビットが評価位置に到達した状態

ビットが近づいて地山が切削されるときには、図 6-5 に示した切削時の応力のバランスから、切削された地山がチャンバー内に入り込む力が切削される地山に作用する。この力を F とし、単位面積あたりの値を σ_F とすれば、一時的に地山側とシールド側との応力バランスは図 6-15 ②-1' のようになり、応力バランスが地山側 > シールド側となって、切削土砂がチャンバー内に入ってくることになる。ここで重要となるのは、地山に σ_c を作用させるチャンバー内の泥土がそのせん断強度によって σ_F による土砂のチャンバー内への浸入を妨げないという点であり、これが、泥土が持つせん断強度が小さいという基本的な特性が果たすひとつの役割の力学的な意味といえる。

一方、地山が切削されると新しい地山面が図 6-5 の A-B 面として出現する。ここでは、この地山面を新切羽面、切削により無くなる切羽面を旧切羽面と呼ぶ。新切羽面にもシールド側から泥土圧 σ_c が作用する。地山 ABC が切削されてチャンバー内に入ってくると入れ替わり、同時にチャンバー内の泥土圧がこの面に作用すると考えると、この面でのシールド側、地山側の応力バランスも概ね図 6-15 の①と同様に図 6-15 の②-1 のように表される。しかし、実際には切削面 A-B は旧切羽面と平行ではなく、ビットによる切削力により地山の応力状態が、 $(^1\sigma_e' + ^1U_e)$ と異なっていると考えられるが、ここでは、この過程に要する時間が極めて短いことから、さらに、ビットの移動により最終的には、この切削面 A-B が切羽に平行な切削面になってしまうことから、その過程と変化を無視する。



ここで、太字記号は、それぞれ、地山側間隙水圧、有効応力、シールド側泥土圧、ビット圧の全体を表す
(σ_B' :ビット圧のうち地山の有効応力上昇に直接寄与する成分)
図中の(1)(2):上昇した順序を形式的に表す番号
 ΔU_e , $\Delta \sigma_e'$ は、そのときのシールドからの作用で上昇した地山の間隙水圧と有効応力

図 6-15 ビットによる地山切削時の地山側とシールド側の応力状態

②ビット部

理想的な切削が切羽全体のビット部で行われている状態でのビット部における切羽面での地山側とシールド側の応力バランスを考えると、図 6-15 の③-1 のようになると考えられる。ここでは、6.2.1(1)で述べたように、 σ_B はビットやスポークが直接地山に作用する応力であり、この作用に対して地山からの有効応力 σ_e' と間隙水圧 U_e の和が釣り合っている状態である。図 6-15 の②-1 の状態からこの状態への変化は次のように説明できる。

カッタースポークの移動によりビット部が評価位置に来ると、まず、 σ_c が σ_B に変わることによるシールド側の応力増加に対して一時的に地山の間隙水圧 1U_e が ΔU_e だけ増加する。一方、ビットが直接地山の土粒子を押す部分もあることから、地山の有効応力を直接上昇させる作用もすると考えられる。したがって、この地山の有効応力を直接増大させるビット圧を σ_B' で表すと、シールド側からの σ_B の作用によって地山の有効応力 ${}^1\sigma_e'$ も $\Delta\sigma_e'(1) (= \sigma_B')$ だけ増加することになる。この状態を表すと、図 6-15 の③-1 のようになる。ただし、ビット部全体を考えると、 σ_B はビットの通過過程でビットが地山に直接接している部分とそうでない部分で相違が生じると考えられるが、これは無視して考える。また、 σ_B は第4章で確認されているように、ビット前面でシールド側から作用していた泥土圧 σ_c より一般に大きい。

次に、ビット圧が地山に作用している時の応力バランスの変化を考えてみる。ビット部では、ビットが通過する間はシールド側からのビット圧が作用し続ける。その間ビット圧 σ_B は変わらないと仮定すると、地山側では有効応力状態に変化が生じ、その変化過程における応力成分 σ_e' 、 U_e の変化を ${}^1\sigma_e'$ 、 1U_e との関係で考えると、次のようになる。

まず、地山の透水係数が大きく、ビット圧の作用で増加した間隙水圧分が急激に散逸する場合には、 σ_B' の作用で上昇した間隙水圧分 (ΔU_e) が消失する。これにつれて、地山の有効応力がさらに、 $\Delta\sigma_e'(2)$ だけ上昇する。したがって、この状態は図 6-15 の③-2 のように示されることになる。反対に、この増加した間隙水圧の消散がゆっくりの場合には、図 6-15 の③-1 から③-2 の状態への移行には時間を要することになる。

一般には、ビットによる切削は短時間の作業であり、図 6-15 の③-1 状態のうちに、または、図 6-15 の③-1 から③-2 の状態への移行過程でビットが通り過ぎることが考えられる。このような場合には、このビット部における代表的な応力バランスとしては、図 6-15 の③-1 と③-2 の中間的な状態として、図 6-15 の③に示すような状態で代表させてもよいと考えられる。図 6-15 の③では、ビットの通過が急速で、短時間でビット後面状態への移行が行われることを考慮して、その過程を簡略化して概念的に、 ${}^2\sigma_e'$ と 2U_e がともにビット前面の状態 (${}^1\sigma_e'$ 、 1U_e) よりも大きい値を示して、 σ_B と ${}^2\sigma_e' + {}^2U_e$ が釣り合っている状態にあることを表している。

ここで作用するビット圧 σ_B は、ビットが切羽と接触して地山を押し続ける力であり、その状態のまま切羽面をスポークが回転することになるため、この高压のシールド側から

の地山への作用は、シールド機に装備されたスポーク本数分の面積で、スポークに沿いながら、スポークの回転速度で継続的に続くことになる。良好な泥土が形成されている場合には、第5章で示した良好な泥土の特性から余剰水が発生せず、地山への継続的な水の浸透が発生しないことになり、切羽地山では、すぐに図 6-15③-2 の地山の有効応力が大きい状態が発生して切削トルクが上昇することになる。

③ビット後面

ビットが通過した後のビット後面では、シールド側でビット圧が消失し泥土圧が再び作用した状態となる。この状態は、ビット前面の最初の状態と同じと考えられ、シールド側だけをとって考えると、図 6-15 の①と同じ状態が再び生ずることになる。ここでは、ビット部からビット後面に移行する過程でシールド側からの応力は σ_B から σ_c に低下する。シールド側でのこの応力変化に伴い地山では、このシールド側の応力変化が生じる直前の応力バランス状態に応じた変化を遂げる。

すなわち、図 6-15 の③-1、③-2 で示した応力バランス状態に応じて地山の間隙水圧、有効応力に変化が生じるものと考えられる。その変化過程を考えると次のようになる。

変化前の状態が図 6-15 の③-1 の場合には、まず、ビット圧で上昇した地山の間隙水圧分 (ΔU_e) は、地山の透水係数に応じた時間を経て消失し、また、 σ_B のうち直接地山の有効応力に作用していた分 σ_B' の消散に伴って地山の有効応力 $\Delta \sigma_e'(1)$ も消失する。その結果、地山側の間隙水圧も有効応力も地山の掘削前の状態に戻るものと考えられ、この終息過程で新たな切削等が行わなければ、図 6-15 の④=①の状態になる。

シールド掘進においてはビット部からビット後面への移行も極めて短時間に生じるが、その後の応力バランスの変化過程でも地山の有効応力と間隙水圧の和が常にシールド側から作用している応力に釣り合う状態を保って変化することになると考えられる。したがって、地山切削過程では、シールド側から σ_c が作用しているだけの状態が生じるときが最も地山への作用圧が小さい時であり、このとき σ_c を ${}^1\sigma_e' + {}^1U_e$ より常に大きい状態に保つことができれば、基本的に切羽面での応力解放は生じないと言える。

しかしながら、カッタースポークの回転に伴い、このような切削が切羽全体で繰り返される掘進状態では、このような局所的な応力バランスの変化は切羽全体として平均化されると考えた方がよい。したがって、切削時の切羽での応力状態の変化としては、平均化された状態としての泥土圧+ビット圧が作用している状況が施工の状況、とりわけ、シールドと地山の接触環境によって変化しながら、掘削が進められることになると言える。

6.3.3 マクロに見た切削時の切羽での応力状態の変化の詳細

6.3.2 の考察結果から地山切削時の切羽面での応力バランスの変化はシールド側から地山への作用応力の変化を起因として、その変化に応じて地山内の応力が変化する形で説明

できることがわかった。また、地山内の応力変化は地山材料が砂であれ粘土であれ、有効応力の原理に従って変化することから、図 6-15 の各段階でのシールド側の全応力変化に対しても、地山側では、材料の透水性と経過時間に応じて差異が生じるものの、ビット圧が直接地山に作用する状態を除き、主として、間隙水圧の変化、続いて有効応力の変化という過程を経て定常状態になると考えられる。

したがって、各段階でのシールド側の全応力の変化速度が速い場合や地山の透水係数が小さい場合には、シールド側の応力状態の変化速度に地山側の応力変化が追従できず、それぞれの变化の過渡的な状態から次の状態へ変化していくことが実際には生じていると考えられる。そのため、図 6-15 に示した①～④の変化過程においても、地山内の有効応力、間隙水圧状態には過渡的な状態があり、最終的に掘削前の①の状態には戻らないことも生じる。むしろ、①の状態に戻らないまま次のビット切削が始まる場合の方が多いと考えられる。したがって、切羽での地山側とシールド側の応力バランスとして、ビット圧作用直前を図 6-15 の②-1、ビット圧作用時を③または、③-1、ビット通過直後を④で代表させ表示することが現実的と言える。

次に、前述のように、このような変化する局所的な作用の継続により、切羽全体として平均化された状態が発生しているものとして、地山切削時の切羽全体でのシールド側と地山側の応力バランスを考える。ここでは、シールド側から地山に作用する総推力からシールド機と地山のフリクションとシールド機内部の機構的な推力の損失分を除いた推進力を T としその切羽全体に対する平均値を σ_T とする。掘進中は切羽全体ではシールド側からシールドの推進応力として σ_T が作用した状態であり、一般に、この σ_T は、第4章でも示したように σ_c より十分に大きい。そのため、泥土圧が地山の初期状態の全応力に等しい場合 ($\sigma_c = {}^1\sigma_e' + {}^1U_e$) でも、切羽全体としては、 σ_T の作用により常に $\int \sigma_T dA = \int (\sigma_B + \sigma_c) dA > \int ({}^1\sigma_e' + {}^1U_e) dA$ となり、切羽全体として見た場合には、シールド掘進中は連続的に地山の初期応力を超えた大きな推進力が作用し続けることになる。

このように、理想状態で切削が行われている場合、ビットによる地山切削過程における切羽面でのマクロな地山応力バランスとしては、その変化過程を通じて、シールド側からの作用応力 σ_T が泥土圧 σ_c を下回らない状態にあるものと考えられるが、切羽面ではビット圧が作用している場所と泥土圧のみが作用している場所があり、全応力バランス的には十分な力を地山に作用させても、局所的な有効応力バランスを考える必要が出てくる。したがって、地山への局所的な作用力が最小になるビット部から次のビット部が来るまでの間のシールドから地山に作用する応力が泥土圧 σ_c だけになる期間において、泥土圧が有効応力成分として地山の初期状態の有効応力 ${}^1\sigma_e'$ 以上の値で作用していることが、掘削による切羽に垂直方向の地山の応力解放を生じさせないために必要になってくる。

6.3.4 地山切削時の添加材注入による切羽における応力バランス

(1) 添加材の注入

砂質土はそれ自体を攪拌，混合しただけではうまく泥土化できない．泥土圧シールドでは，このような地山に対して，一般に，チャンバー内土砂の塑性流動化を促進し良質な泥土とするために図 6-16 に示すようなフィッシュテール部やカッタースポーク部に設置した注入孔から切羽面に対して添加材の注入が行われる．一方，カッタースポーク部からの注入は図 6-17 に示すように，模式的には，図 6-9 の②で示したビット部の中間点から行われる．この注入は切削時の切羽で地山の間隙水圧より大きな圧力で行われ，切羽における地山側とシールド側の応力バランスに影響を与える．添加材注入が行われる場合は，地山がビットによって理想的に切削される場合でも，切羽と泥土の間に添加材が介在する状態が発生することになる．良好な泥土化が行われていれば，地山の間隙水と添加材の余剰水が発生し，前述の理想的な掘削が行われている状態とは異なった接触環境が生じることになる．この接触環境は，ビット圧による地山の崩しやゆるみが発生しているかどうかは別にしても，切羽で発生する現象が，図 6-7 に示した一般の掘削の場合と同じものと考えられることから，以下では，添加材注入が行われる場合として，一般状態での掘削が行われる場合について検討する．

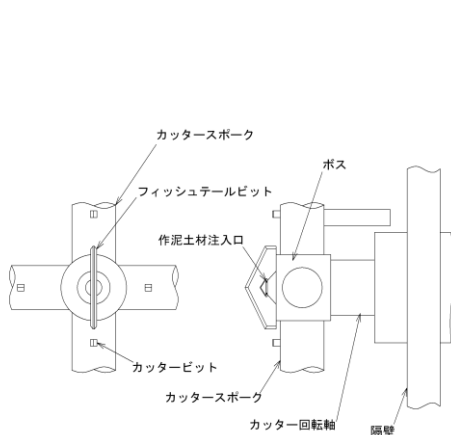


図 6-16 フィッシュテールの構造

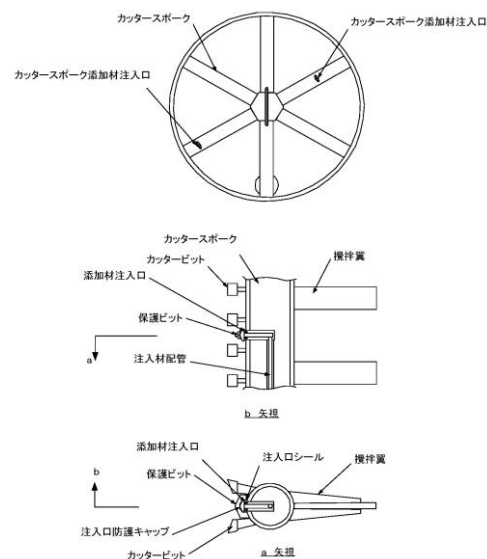


図 6-17 カッタースポーク部の添加材注入口

ここでの添加材注入が切羽での応力バランスに与える影響としては，第4章で示したように添加材注入が泥土圧の上昇を引き起こすこととして評価する．フィッシュテールの注入孔から行われる注入は，カッターヘッドの回転に合わせ定時的に，あるいは，定量的に実施されることから，この部分では，常に注入圧の作用と地山の切削，土砂および添加材のチャンバー内への取り込み，攪拌が同時に行われることになる．本節では，この添加材注入の影響について，6.3.2, 6.3.3 で行った方法と同様に考察する．考察を簡単にするために，まず，はじめにビット部での添加材の注入について述べる．

(2) 一般の掘削の場合

図 6-7 で示した一般の掘削の場合では、第 4 章で示したビット圧の地山に対する作用状況や泥土圧への影響を考えると、ビット圧の作用は、その圧力の一部が地山の有効応力を増大させる機能を発揮するほかは、泥土圧あるいは、この泥土圧と地山の間の介在物の圧力上昇に寄与するものと考えることが現実的と考えられる。

(3) ビット部での添加材注入

注入される添加材は粘性の高い流体であり、第 4 章で示したように、切羽部での添加材の注入は地山側、シールド側のいずれの側にも同じ流体圧として作用すると考えられる。したがって、理想的な切削が行われている場合の添加材の注入を伴う地山の切削過程では、6.3.2 にこの添加材注入過程を加えた①ビット前面から②ビット部、③ビット後面に進むまでに生じる応力バランスの変化を考えればよいことになる。

①ビット前面

この場合でも、ビット前面では、添加材の注入が行われない場合のビット前面と同様に次の 2 つの応力状態が生じる。

- 1) 切削の影響を全く受けない初期状態 (図 6-15 の①)
- 2) ビットの切削の影響を受け、地山が削ぎ落とされる段階であるが、ビットはまだ到達していない状態 (図 6-15 の②-1)

②ビット部

ビット部では、次の 4 つの応力状態が生じると想定される。

- 1) ビット圧が地山に作用した直後の状態 (図 6-18②)
- 2) ビット圧の作用に加えて添加材注入圧が作用している状態 (図 6-18③, ③-1)
- 3) 添加材注入の後にビット圧が作用している状態 (図 6-19)

1) ビット圧が地山に作用した直後の状態

この状態は、(2) の考え方に従うと、図 6-15③-1 と同様であり、図 6-18②に示す状態となる。

2) ビット圧の作用に加えて添加材注入圧が作用している状態

ビット圧が作用した状態で添加材が注入される場合、前述の仮定どおり注入圧は、地山側、シールド側いずれにも同じ圧力として作用する。この状態は図 6-18③のように表される。しかしながら、粘性の高い流体の添加材といえども、第 5 章に示した測定結果から、必ずしも、注入圧分がシールド側の圧力上昇につながるわけではない。さらに、シールド側の切羽部分では、添加材、泥土、掘削土の攪拌、混合が継続的に行われており、ビット圧の作用は地山に対する直接的な作用ではなく一部が作用し、他は泥土圧と一体的に評価すべき状況と考えられることから、ビット圧も添加材注入圧も泥土圧と一体と評価することができると思われる。

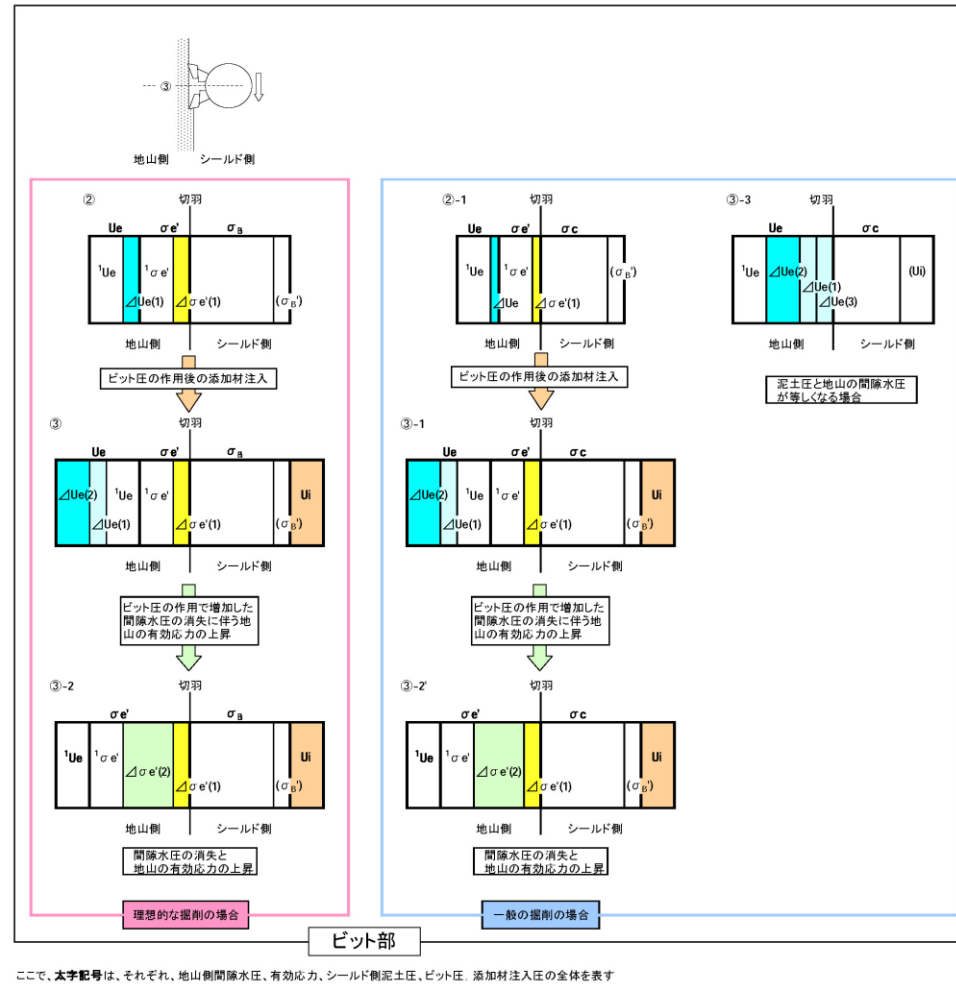


図 6-18 ビット圧の作用後に添加材の注入が行われる場合の切羽での応力バランス

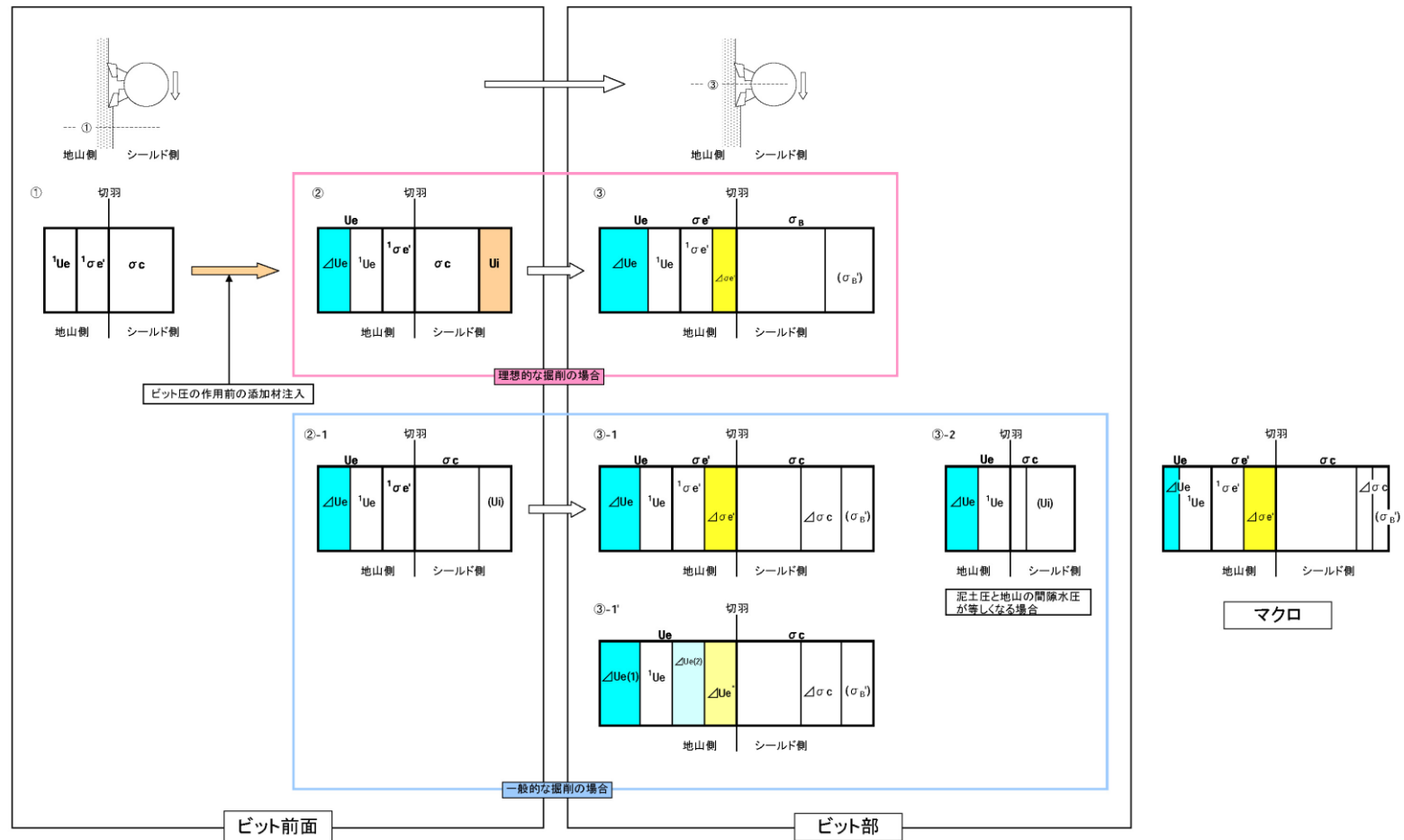


図 6-19 添加材の注入後にビット圧が作用する場合の切羽での応力バランス

この状態は、図 6-18③-1 のように表すことができる。このとき、泥土圧の土水一体の作用が添加材注入によって変化することも考えられるが、簡単のため、泥土圧の地山の有効応力と釣り合う量は変わらないものとする。

図 6-18③, ③-1 の応力状態になった切羽地山は、周辺地山に対して $\angle U(1)$, $\angle U(2)$ で示した間隙水圧分の過剰間隙水圧を持つことになる。良好な泥土が形成され、泥土化に使われる以外の余剰水が切羽付近に無い場合には、そのままこの過剰間隙水圧は消散して図 6-18③-2 のようになる。一方、添加材が注入される環境では、良質な泥土が作られるのに必要最小限の添加材注入が行われた場合でも、第5章で示した良質な泥土の性状から、掘削土砂に含まれていた地山の間隙水分が余剰水となって切羽付近に残ることになる。

さらに、一般の掘削の場合のように、ビット部ではビット圧の作用により泥土圧が上昇する成分と、一部地山の有効応力を増大させる成分が地山に作用している状態となり、その応力バランスは図 6-18②-1 のように表される。この状況に対して添加材が注入される状況では図 6-18③-1 のようになり、この余剰水を含む、崩れた地山や切削土および添加材の混合水が地山側の応力と同じ大きさの圧力となることから、この混合水に含まれる余剰水は地山に排出され、切羽地山と周辺地山との間隙水圧の相違から、この排出された余剰水は地山中に浸透することになると考えられる。また、シールドの掘進が続けられる状況では、このような混合水の状態が継続して発生することになり、地山側への余剰水の供給が継続的に行われることになる。したがって、切羽地山付近の過剰間隙水圧の高い状態が維持され、この過剰間隙水圧が原動力となって相対的に間隙水圧の低い周辺地山への水の浸透が継続的に発生すると考えられる。

つくば T や常磐道 T では、注入される添加材は単線トンネルでも 1 リングあたり 10 m³ 以上にも達する¹²⁾こと、また、第4章で示したように、これらのトンネルでは、シールド掘進時の掘削地山量、添加材注入量と排土量の比較から、実際の排土量から添加材注入量を除外した量(体積)が掘削地山量(体積)の 70%~75%程度になっていること、さらに、切羽地山付近の間隙水圧が泥土圧にほぼ等しい状況が計測されていることを考慮すると、一般の掘削の場合で、シールド側から地山側への水の排出と地山内での水の浸透が発生しているときに地山の間隙水圧と泥土圧が等しくなるような場合の応力バランスは、図 6-18③-3 のように表される可能性がある。この図ではシールド側から地山へ作用する応力として計測できる泥土圧を表示し、それと添加材注入、ビット圧作用により増大した間隙水圧を含む地山側の全水圧が泥土圧とバランスしている状態を示している。逆に、このような応力バランスが継続して発生し、切羽付近で継続的に泥土化に伴う余剰水が生まれる環境が余剰水を地山へ排出、浸透させているものと言える。

3) ビット圧が作用する前に添加材注入が行われる場合

ビット圧が作用する前に添加材注入が行われる場合は、注入前の初期状態は図 6-19①で表され、この状態に対して添加材注入圧が作用する状況として、理想的な切削が行われる場合には、図 6-19②のように表される。また、この状況は 2) で述べたようなシールド側

の切羽部分の状態を考慮すると図 6-19②-1 のようになる。図 6-19②-1 の状況下でビット圧が作用する場合には、ビット圧の作用により泥土圧が上昇し、さらにビット圧が直接地山の有効応力を上昇させる成分をもって、地山に作用することになる。その状態は図 6-19③-1 のように表される。

この応力バランスはビット圧作用後に添加材注入が行われる場合と同じもので、この応力バランスによって、前述の 2) の場合と同様の状態が切羽付近で発生することから、地山への水の排出・浸透が掘進中、継続的に発生することになる。

一方、つくば T や常磐道 T のように切羽地山の間隙水圧と泥土圧が同じ状況になる場合も、図 6-19③-1' のように表され、泥土圧を基本とした掘進管理で、地山に作用する応力が泥土圧のみの場合には、切羽面では地山側に作用する地山の有効応力と釣り合うべき圧力が消失して地山の水平方向の有効応力が完全に解放された状況が発生しているとも考えられる。したがって添加材注入とビット圧の作用順序が 2) とは逆である 3) の場合でも、一般の掘削の場合には、図 6-18③-3 の状況が発生する場合には、同様のことが生じうるものと考えられる。

③ビット後面

ビット後面では、再び、泥土圧が作用する状態に戻ることから、地山の透水性に応じて過渡的な応力バランスが発生するものの、基本的には、添加材の注入がない場合と同様の経緯をたどるものと考えられる。

(4) マクロに見た添加材注入を伴う地山掘削時の応力バランス

添加材注入により良質な泥土を作って掘進を行う場合には、泥土と地山切羽の間には、泥土化に使われなかった余剰水が必ず発生している。また、前述のように、シールド側から地山への水の排出と地山内部への水の浸透が切羽全体でほぼ定常的に発生するものと考えられ、シールド掘進時の切羽全体での応力バランスは、図 6-19③-1 のような、シールド側からは添加材注入圧とビット圧の影響を含んだ土水一体の泥土圧と大きさは施工状況によって異なる地山の有効応力を直接上昇させるビット圧（図中の σ_B' ）が作用し、地山側ではそれと釣り合う地山の有効応力と間隙水圧が作用していることで代表させることができると考えるが、この応力バランスのうち、シールド側からの作用応力 $\Delta\sigma_c$ と σ_B' は切羽全体で平均化され、絶対値としては図 6-19③-1 より小さくなり、それに応じて地山側の $\Delta\sigma_e'$ も ΔU_e も小さくなる。

また、地山切羽近傍の間隙水圧が泥土圧にほぼ等しくなる状況は、(3) で示したのと同様に、図 6-19③-2 で表されることになり、 σ_B' を考慮に入れなければ、(3) で述べたように地山の水平方向の有効応力が切羽全体に渡って解放されている状態が生じている可能性を示すと理解できる。

以上のことから、切羽全体としても地山の初期状態の水平方向の有効応力を解放させな

いような掘進を行うための掘進管理としては、泥土圧を静止土圧と水圧の和とするだけでは理論上十分でない可能性があると言える。

(5) フィッシュテール部からの添加材注入

フィッシュテール部はフィッシュテールビットと呼ばれ、それ自体が巨大なビットの機能を果たす。したがって、この部分では、掘削土が泥土としてチャンバー内に取り込まれるのに幾分時間を要するものの、カッタースポーク部と同様にシールド機の推進力でフィッシュテールが地山に食い込んで回転することによってシールド側の間隙水圧を高めて泥土化に使われなかった余剰水を地山側に排出する作用をすると考えられる。したがって、この部分での局所的な応力バランスも基本的には他のビット部と同様と考えられる。そして、一般の掘削の場合には、マクロに見た添加材注入を伴う地山掘削時の応力バランスで述べた図 6-19③-1 のように、フィッシュテールと切削ビット、添加材注入の地山への作用を反映した泥土圧が地山へと作用するとともに、第 2 章で示したビット圧の存在からフィッシュテールと切削ビットが直接地山に作用する状況が発生しているものと考えられる。

(6) 掘進中の応力バランスの検討の施工管理への反映

シールドの掘進に際して、良質な泥土を作るために添加材注入による泥土化が必要な帯水性砂質地山では、掘進中のシールド側から地山への水の排出と地山内での水の浸透を避けることができない。排出される水の供給源は地山の掘進速度で決まる地山の掘削土量と添加材注入量であり、注入した添加材と掘削土の攪拌混合により適切な塑性流動化がなされた場合に余剰水として発生する水の量を地山に排水できる泥土の物性と圧力の確保が泥土化の最良に条件であり、余剰水を適切に排水できない場合には、過水状態の泥土ができることになり泥土の性質は悪くなる。

一方、この余剰水を排出する主たる源は、その掘削環境によって変化するビット圧とともにビット圧・添加材注入圧の作用を受けて変化する泥土圧である。また、掘進中にこれらの作用によってシールド側から地山側へ排出された余剰水によって発生した切羽地山の過剰間隙水圧と周辺地山の間隙水圧の差、さらに、地山の透水係数・貯留係数等の地山固有の条件が地山内に浸透する水の量を決めることになる。良好な泥土化のためには、掘進と泥土化によって発生する余剰水量と地山に排出される水の量、そして、地山内に浸透していく水の量は等しくなければならない。したがって、地山内部に浸透していく水量だけ余剰水が発生するように添加材注入量と掘進速度を制御しなければならないことになる。

以上のことから、掘進管理は、

- ① 余剰水の量
- ② 地山にすべての余剰水を排出する余剰水圧（＝泥土圧）
- ③ 地山の透水係数・貯留係数等によって決まる排出された余剰水を地山に浸透させるのに必要な切羽地山の過剰間隙水圧（間隙水圧）

④ ①～③の結果として決まる泥土圧

という4つの要素に対して、要約すれば、掘進速度と添加材注入量で地山に排出する余剰水量を制御し、掘進速度と排土量で推進力と泥土圧を制御することで、地山への余剰水の排出と地山内での浸透が順調に行われるようにこの泥土圧を維持することになると考える。言い換えれば、掘削管理は、地山への余剰水の排出と地山内部への浸透の円滑化のために、泥土の性状、泥土圧を監視し、掘進速度、添加材注入圧・量、排土量を制御することにあると言える。ただし、ここでは、ビット圧や添加材注入・量は泥土圧に影響を及ぼす1つの要素として位置付け、結果的に推進力の作用の一部として泥土圧を高める要素と見なしている。

一方、切羽における地山の応力解放を防止するためには、この余剰水の排出・地山内部への浸透が発生する応力バランスに加え、地山の初期状態の水平方向有効応力に等しい有効応力が地山に作用しつづける状態を作るように泥土圧を制御しなければならない。したがって、地山への影響をできるだけ押さえるために掘進前の地山初期応力状態を保つ掘進管理としては、この地山への水の排出・浸透と切羽での地山の水平方向有効応力の解放防止という2つの機能を果たすための施工管理方法が、求められる施工管理の方法と言える。切羽地山の間隙水圧は、時として、泥土圧と同じ位まで上昇することから、施工管理上は、このような状態でも地山の有効応力の解放を押さえるための圧力を地山に作用させる必要がある。このときシールド側から有効に作用することが期待されるのが、泥土圧とともに作用する力として、直接、地山の有効応力を上昇させる機能を有し同じ推進力を源とするビット圧ということになる。ただし、仮に、切羽において地山間隙水圧と泥土圧が同じになったとしても、定常的に切羽地山から周辺地山へ水の浸透が発生している場合には、浸透の原理から切羽の奥の地山では、動水勾配に応じて水の流線に沿った方向の有効応力が増大することから、水平方向の有効応力の解放は切羽面に限定されることになり、地山に連続的な水の浸透が発生している状況では地山が安定した状態を維持できるものと考えられる。

したがって、求められる施工管理のための管理要素は、良好な泥土化が行われていることを前提とすれば、掘進速度、添加材注入量と泥土圧とビット圧あるいは、ビット圧の直接測定が困難なことから、泥土圧と推進力ということになる。

6.3.5 掘進停止中の応力バランス

シールドの掘進が停止されると、一般に、図 6-20 に示すように、推進ジャッキによって加えられていたシールド機の推進力が消失し、地山に作用するシールド側からの作用力はチャンバー内からの泥土圧だけとなる。掘進中は、推進ジャッキによる推進力の一部はシールド鋼殻外面と地山との摩擦を切るのに使われるものの、主に、フィッシュテールやスポークとそれに取り付けられているビットを介して地山に伝達され、6.2.1 で述べたビ

ット圧として作用しているものと考えられ、第4章でも示したように、局所的なビット圧は泥土圧より大きいことが確認されている。したがって、ビット圧はシールド掘進停止に伴って推進ジャッキのストロークを固定したとしても、推進力は掘進停止と同時に急激に消失する。したがって、掘進停止により、添加材を用いて作った泥土の場合には、図6-21に示す現場計測結果に見られる掘進停止直後の急激な地山の間隙水圧の低下と泥土圧の低下が生じる。その後、地山の間隙水圧もチャンバー内の泥土圧も徐々に低下を続け、それに伴って地盤沈下も増加していく。

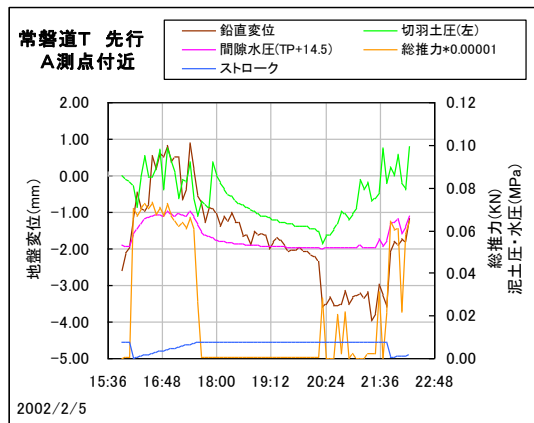


図 6-20 掘進中、掘進停止後の計測値の変動

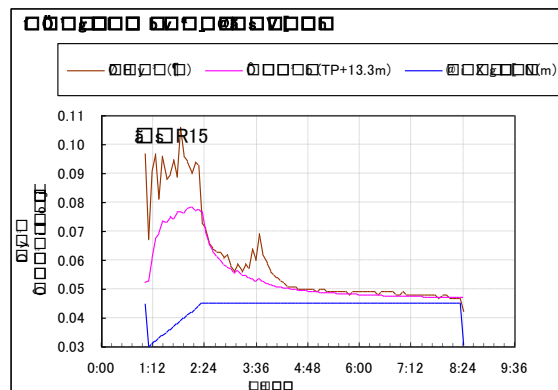


図 6-21 掘進中、掘進停止中および掘進停止後の切羽土圧と地山間隙水圧の変化

一方、掘進停止中の泥土圧の低下が地山の沈下を助長するという考え方から泥土圧を上げるために添加材の注入や推進ジャッキの再加圧が行われることがある。添加材注入時の泥土圧の変動状況は、図6-22のとおりであり、添加材注入により地山の沈下が防止されている状況が見てとれる。ここでは、この過程における切羽での応力状態を、次の5つの状態からなるものと考え、6.3.2で用いた手法で応力バランスを考察する。

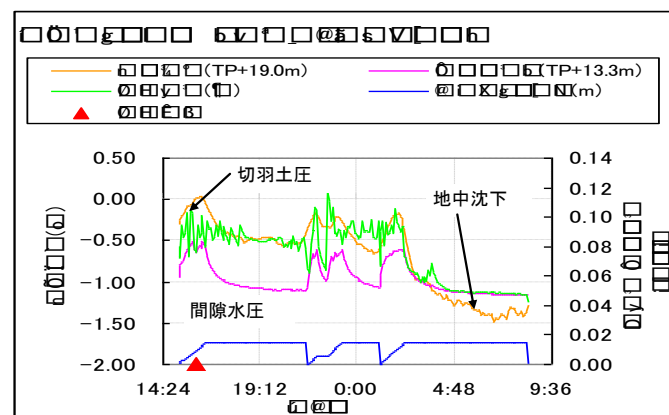


図 6-22 掘進停止中の添加材注入による泥土圧の維持と地中沈下と間隙水圧変動

- (1) 掘進停止直前の応力バランス
- (2) 掘進停止直後の応力バランス
- (3) 掘進停止後の応力バランス
- (4) 掘進停止中の添加材注入時の応力バランス
- (5) 掘進停止中の推進ジャッキによる加圧時の応力バランス

(1) 掘進停止直前の応力バランス

掘進中のビット部分における切羽の応力状態は、図 6-15 で示したビット部分とビット前面の 2 つの状態に分けられるが、6.3.3 で述べたように、切羽全体をマクロに見た場合、シールド側からは推進力と添加材注入圧に起因する応力 σ_T が作用していることになる。また、泥土圧を地山の初期応力状態に合わせて管理する場合には、地山側ではそれに応じて、初期応力状態の地山有効応力や間隙水圧よりそれぞれ大きな有効応力 σ_e' と間隙水圧 U_e が作用した状態になっている。その状態を図示すると、図 6-23 のように表される。この状態が掘進停止直前のシールド側から推進力が作用した状態の切羽での応力バランスになっていると考える。

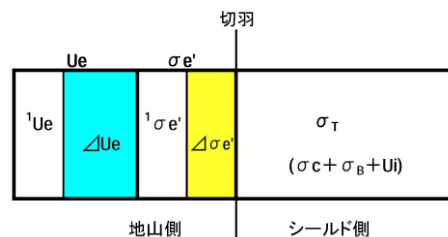


図 6-23 掘進停止直前の切羽での応力状態（マクロに見た場合）

(2) 掘進停止直後の応力バランス

掘進停止に伴い推進力が消失し、推進力に起因するビット圧や添加材注入圧も消失する。さらに、推進力に起因する泥土圧もゼロになるはずであるが、図 6-24 や図 6-25 に示すとおり、泥土圧はゼロにはならない。この泥土圧の変化は、第 4 章、第 5 章でも示したように、推進力がゼロになっても、推進ジャッキのストロークは固定され、基本的には加圧されていたチャンバー内容積も掘進停止直前と同じ容積に固定された状態に置かれること、土粒子と添加材から構成される泥土の土粒子と添加材が一体となった構造特性が変化することあるいは徐々に容積の固定が緩むことによってこの推進力と添加材注入圧の消失に対応していることを示している。これに対して、ビット圧や添加材注入圧の作用が無くなった切羽地山では、有効応力と間隙水圧にシールド側で消失した作用圧分の応力低下を引き起こす。このことは、図 6-21 に示した掘進停止に伴う地山間隙水圧の現場計測結果からも推定できる。

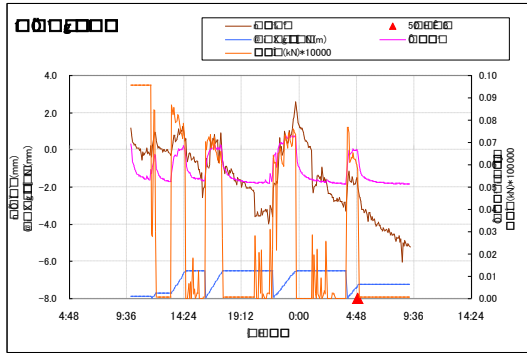
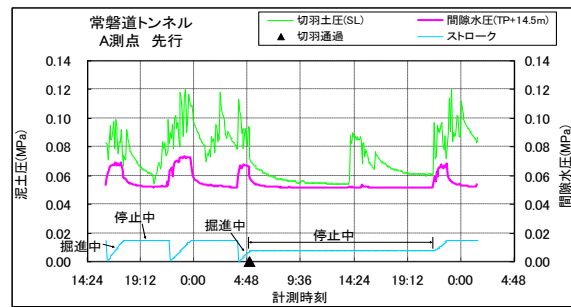


図 6-24 掘進停止前後の推進力の変化


図 6-25 掘進停止後の間隙水圧と
泥土圧の変化

また、図 6-25 の掘進停止直後の泥土圧と地山間隙水圧の変化状況からは、第 4 章、第 5 章で示したとおり間隙水圧の低下に呼応する形で、泥土圧が低下しているように見える。その後も、泥土圧、地山間隙水圧ともに、連動して緩やかに圧力が低下していく。これが、図 6-21 に見られる、掘進停止直後の泥土圧の急激な低下とその後の緩やかな低下である。

この過程の切羽における応力バランスの変化を図 6-23 からの変化として考えてみると図 6-26 のようになる。掘進が停止すると、図 6-24 のように総推進力がゼロとなり、図 6-23 の応力状態からシールド側からの σ_T が急激に低下する。この過程は、次のように説明できる。 σ_T は泥土圧 σ_c 、ビット圧 σ_B と添加材注入圧 U_i から構成されているので、 σ_T の急激な低下は主として、 σ_B と U_i の消失を意味し、そのとき、特別なマシンコントロールをしない限り、シールド側の泥土圧も低下した状態に変化する。 σ_T の低下に伴って、また、掘進の停止に伴う地山への水の排出が停止することにより、地山側では初期応力状態より大きかった間隙水圧 U_e とビット圧によって直接増加させられていた有効応力 σ_e' が低下し、それぞれの ΔU_e と $\Delta \sigma_e'$ が消失する。その低下量はシールド側の低下量 (σ_B と U_i の和および急激に低下した泥土圧分) に等しいと考えられる。この切羽地山での応力低下が切羽から離れた地山内に影響して発生した地山の間隙水圧の低下が、図 6-21 に示した地山の間隙水圧の掘進停止直後の急激な低下であり、その結果、まだ、地山側の間隙水圧が 1U_e より大きい状態の場合には、切羽では図 6-26 に示す状態が発生する。一方、シールド側の応力低下により地山側の間隙水圧が 1U_e より小さくなるほどの変化が生じる場合には、砂質土の場合、周辺地山からの水の移動がすぐに発生し、

$$U_e \rightarrow {}^1U_e, \quad \sigma_e' \rightarrow \sigma_c - {}^1U_e$$

となり、図 6-27(1) の状態が発生する。

図 6-26 では、シールド側の泥土圧 σ_c は初期状態の地山側の間隙水圧と有効応力の和より大きく、切羽側の間隙水圧は初期状態の間隙水圧より大きい。このことが以後発生する泥土圧の低下の一因と考えられる。一方、軟弱粘土を攪拌・混合して作った泥土の場合は、掘進停止直後は泥土圧の低下がほとんどないと考えられることから、図 6-26 で $U_e > {}^1U_e$

の顕著な例となるものと考えられる。

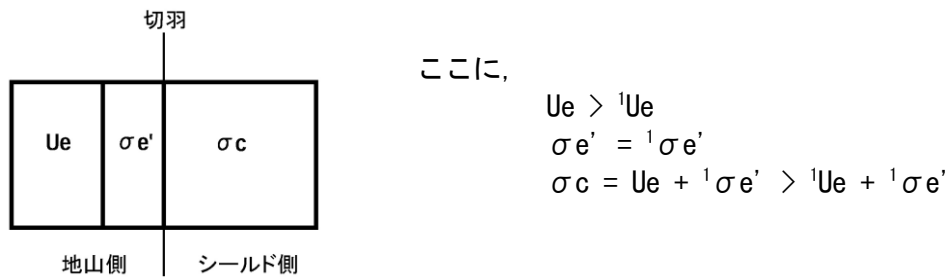


図 6-26 掘進停止直後の切羽での応力状態

(3) 掘進停止後の応力バランス

掘進停止後、次の (4)、(5) で示すようなシールド側からの作用力に特別な変化がない場合には、図 6-26 の状態から、切羽地山の間隙水の周辺への移動に伴う水圧低下と泥土の特性からの泥土圧の低下が呼応して双方に緩やかな応力低下が発生し、最終的には図 6-27 (1) に示すような初期状態を経て、さらに泥土圧が低下すれば、図 6-27 (2)、(3) に示す地山の主働応力状態、あるいは地山が自立する場合には、静水圧状態まで変化していく。軟弱粘土を攪拌混合して作った泥土の場合は、周辺地山も粘土で周辺部への間隙水の移動に多くの時間を要することになるものの、泥土の特性に基づく泥土圧の応力緩和やその後の変化経過は、時間要素を無視すれば添加材を用いた場合と同様と考えられる。

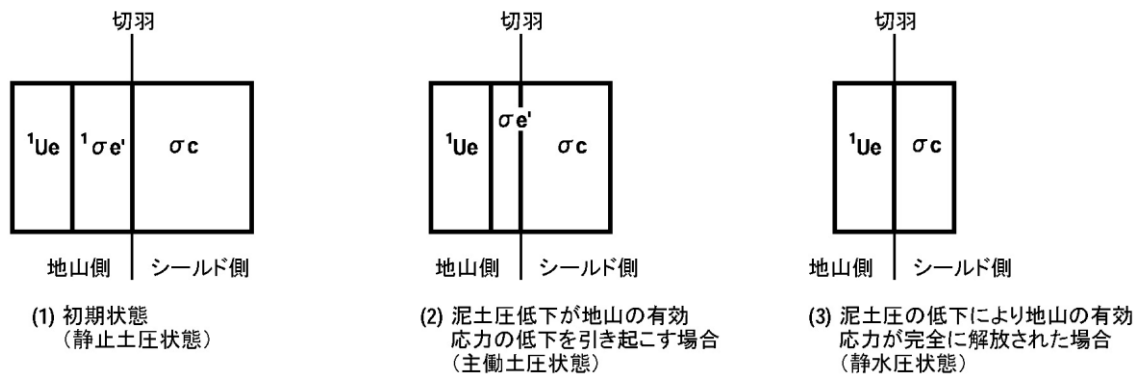


図 6-27 掘進停止後の切羽での応力状態

既に示した図 6-20 や図 6-25 のように、一般に、掘進停止中に泥土圧はゆっくり低下する。この低下の要因と低下のメカニズムは第4章、第5章で述べたとおりである。

検討の仮定では、最小の泥土圧を $\sigma_c = {}^1U_e + {}^1\sigma_{e'}$ としているものの、一般の施工において、 $\sigma_c < {}^1U_e$ とまではいかなくてもジャッキ操作の不手際などで $\sigma_c < {}^1U_e + {}^1\sigma_{e'}$ という状態が発生することがある。このとき泥土圧が σ_c だけ低下すると、有効応力の原理に従えば、この低下に伴って地山の間隙水圧がまず低下する。しかしながら、低下した間隙水圧 U_e より周囲の地山の間隙水圧 1U_e が大きい場合には、帯水砂質地山のような透水性地山では、すぐにその間隙水圧は周囲と同じ値まで回復し、シールド側の泥土圧の低下

分が地山側の有効応力の低下となり、地山の有効応力 $\sigma e'$ は $(\sigma e' - \Delta \sigma c)$ になると考えられる。したがって、初期状態の地山有効応力の大きさより泥土圧の低下量が大きい場合には、図 6-27 (3) に示す状態になる。

硬質の砂質地山などでは、実際の施工において、掘進停止中にチャンバー内泥土圧が静水圧状態（地山の初期状態の間隙水圧）まで低下することがしばしば観測されていることから、掘進停止時の切羽における応力バランスの変化の要因が過剰間隙水圧の消散であれ、人為的な泥土圧の低下であれ、地山が自立していれば、泥土圧が低下の継続により最終的には図 6-27 (3) の状態に移行することになるものと考えられる。

(4) 掘進停止中の添加材注入時の応力バランス

掘進停止中に低下した泥土圧を上昇させたり、泥土圧低下を抑止する目的で隔壁から添加材の注入が行われることがある。掘進停止状態では、添加材が注入されても、カッタースポークや攪拌翼の回転による泥土の攪拌、混合が行われないため、既存の泥土と切削土、地山間隙水や添加材が一体となって、掘削中のような泥土状態を作ることができない。ここでは、そのときの切羽における地山側とシールド側の応力バランスを考える。

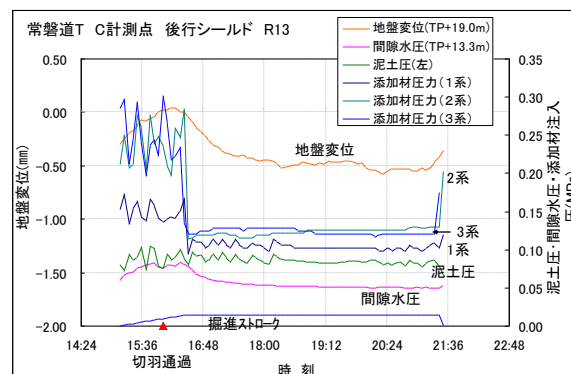


図 6-28 掘進停止中の添加材注入と泥土圧および地山間隙水圧の関係

掘進停止状態で添加材が注入圧 U_i で注入されると、図 6-28 からわかるように、添加材の注入によって、泥土圧として計測されるチャンバー内の圧力が増加して高い状態が維持される。一方、近傍の地山内の間隙水圧はほとんど上昇していない。そして、この増大した泥土圧は、添加材注入圧の低下と良い相関を示しながら変動していく。また、加えられた添加材注入圧がそのまま泥土圧の上昇量にはならないものの、添加材注入圧と泥土圧はリンクしていることから、以後の考察にあたっては、添加材注入圧が泥土圧を上昇させる要因と考え、添加材注入圧 U_i が泥土圧に付加されて地山側に作用する状態になるものとする。

(3)の考察をもとに、添加材の注入が行われたときの切羽での応力バランスを考えると、

掘進停止後の泥土圧の低下量と初期状態の地山の間隙水圧の関係から、次に示す3つの状態があると考えられる。

- 1) 泥土圧 σ_c と地山の間隙水圧 U_e は掘進停止直前よりも低下しているものの、地山の有効応力 σ_e' の低下は生じていない状態 ($\sigma_c \geq U_e + \sigma_e$) (図 6-26) または、静止土圧状態 (図 6-27(1))
- 2) 泥土圧 σ_c の低下が地山の有効応力の低下まで引き起こしている状態 ($\sigma_c < U_e + \sigma_e$) (主働土圧状態) (図 6-27(2))
- 3) 泥土圧が低下し地山の有効応力が解放されてしまった状態 ($\sigma_c = U_e$) (静水圧状態) (図 6-27(3))

以下では、それぞれの場合における切羽での応力バランスを考察する。

- 1) 泥土圧 σ_c と地山の間隙水圧 U_e は掘進停止直前よりも低下しているものの、地山の有効応力 σ_e' の低下までは達していない状態や静止土圧状態で添加材の注入が行われる場合

隔壁から添加材が注入されると、添加材注入圧 U_i が泥土を介して地山側に作用して、図 6-29(1) のようになる。このとき、泥土は間隙が添加材で満たされ、更なる攪拌混合も行われないことから、新たに添加材が泥土の間隙に浸入していくことができないため、添加材注入圧が直接泥土を加圧する圧力として作用する。この作用が、泥土圧の上昇として計測されることになる。

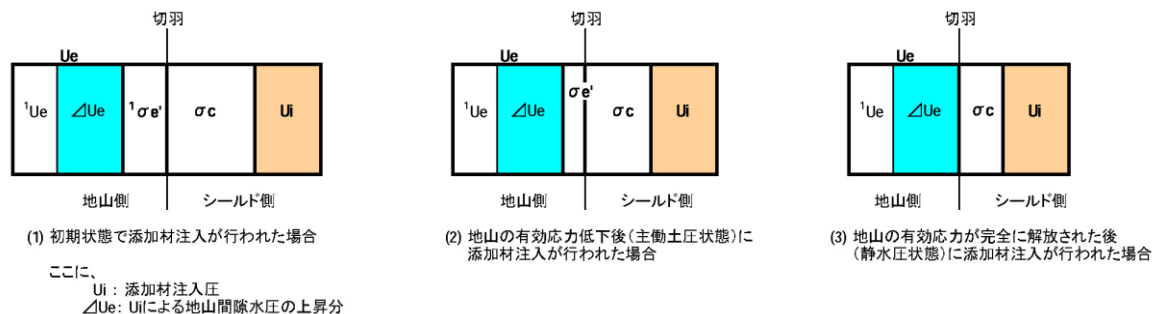


図 6-29 掘進停止中の添加材注入時の切羽での応力状態

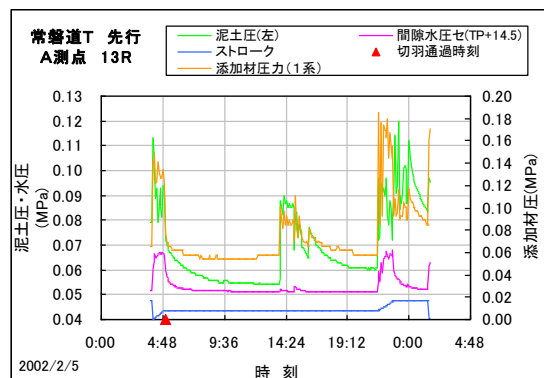


図 6-30 掘進停止中の添加材注入圧に対する泥土圧と切羽近傍の地山間隙水圧の挙動

また、図 6-30 からは、さらに大きな圧力での添加材注入を継続して行くと、泥土圧の上昇ばかりでなく、地山内の間隙水圧も低下が抑止されたり、逆に上昇する現象も生じていることがわかる。図 6-28 と図 6-30 を比較して考えると、泥土圧の上昇も地山の間隙水圧の上昇も添加材の量というよりは圧力により影響を受けていることがわかる。さらに、これらの図からは、泥土圧が掘進中と同じ位まで上昇しても、地山内の間隙水圧は掘進中よりもはるかに小さい上昇しか示さないことがわかる。ここで泥土圧の上昇が地山内の間隙水圧の上昇として観測されないのは、第4章で述べたように、地山に同じ水圧を有した圧力水の排出がなく、透水性の地山では、圧力変動による局所的な間隙水圧の上昇がすぐに消散してしまうためと考えられる。したがって、このとき添加材注入圧が維持されれば、添加材注入で増加したシールド側からの応力上昇分が地山の有効応力上昇になることになる。

以上のことから、添加材の注入圧 U_i が変動して高くなっても、応力バランスは、泥土圧の低下が無ければ、模式的には、図 6-29 (1) と図 6-31 (1) の間を変動することになる。

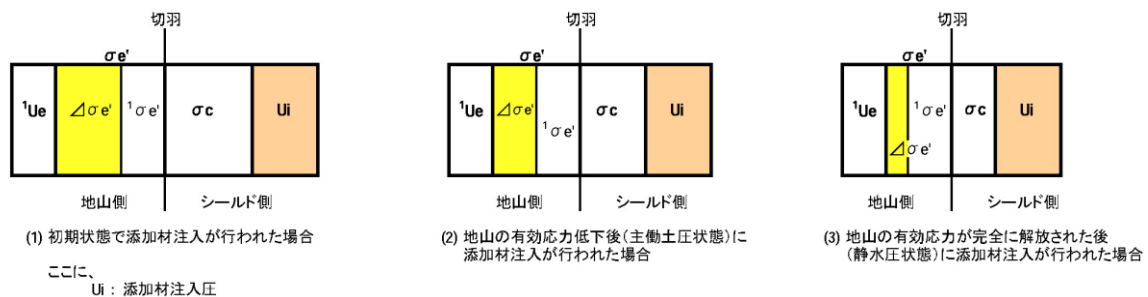


図 6-31 掘進停止中の添加材注入時の切羽での応力状態（地山の有効応力の回復）

2) 泥土圧 σ_c の低下が地山の有効応力の低下まで引き起こしている状態（主働土圧状態）で添加材が注入される場合

切羽での応力バランスは、基本的には1)の場合と同様であり、図 6-29 (2) と図 6-31 (2) の間を変動することになる。また、地山の間隙水圧への影響も1)の場合と同様と考えられる。

3) 泥土圧が低下し地山の有効応力が解放された状態（静水圧状態）で添加材が注入される場合

この場合、泥土圧として計測されているのは、基本的に地山の間隙水圧に相当する値だけであり、2)の場合との相違は、添加材注入前の状態で地山の有効応力が完全に解放されているか、いないかの違いである。この場合も、添加材の注入によって、切羽での応力状態は、1), 2) 同様に、図 6-29 (3) と図 6-31 (3) の間を変動することになり、地山の間隙水圧に対する影響も1), 2) と同様と考えられる。

(1) から (4) までの考察により、掘進停止時には掘進中切羽に作用していた推進力を源とする作用力が無くなり、泥土圧も大きく低下する。そして、人為的な作用がなければ、掘進中増加した地山の過剰間隙水圧が消散して初期応力状態の間隙水圧 1U_e に戻る。この過程で泥土圧も地山の間隙水圧 U_e と有効応力 σ_e' の和と釣り合う形で低下を続け、初期状態を経て、さらに地山の主働状態、あるいは地山が自立する場合には、静水圧状態まで変化していく。一方、掘進が停止しても、人為的に泥土圧 σ_c を地山の初期応力状態 (${}^1U_e + \sigma_e'$) より大きな値で保持すれば、地山への水の排出がないので、切羽における地山の有効応力の解放は生じないことになり、さらに、一旦低下してしまった泥土圧を元に回復させて維持することにより、図 6-29 に示したそれぞれ添加材注入前の状態と添加材注入圧に応じて、図 6-31 のように、地山の有効応力も回復することが予想される。したがって、添加材注入により泥土圧を初期状態の静止土圧＋水圧に維持するように管理した場合には、その圧力を維持することで地山の有効応力も静止土圧状態に戻り、初期状態の応力バランスに戻ることになる。

しかし、添加材の注入を停止すれば、掘進停止後と同じ経過をたどることが容易に予想でき、さらに、この添加材注入により、チャンバー内に掘進停止直後よりも多くの添加材が混入しているため、泥土の性質が悪化していることが予想される。

また、掘進停止中に行う添加材の注入は泥土圧を速やかに上昇させるものの、地山内の間隙水圧を上昇させるためには、この圧力上昇とともに、高い圧力を有した水の地山への継続的な排出が必要であると言える。

(5) 掘進停止中の推進ジャッキによる加圧時の応力バランス

添加材の注入と同じ目的で、掘進停止中にシールド推進ジャッキのストローク維持に変えて、切羽面を再加圧することが行われる。このときも、カッタースポークは回転させず、切羽にカッタービットを食い込ませ押し付ける作用のみを行うのが一般的である。ここでは、この作用によって生じる地山側とシールド側の応力バランスの変化について考える。ただし、ここでのジャッキ圧の作用は、ビットとスポーク部分という局部的なものではなく、切羽全体への作用として取り扱う。

シールド側から地山に及ぼす加圧作用は、6.3.3 の表現方法に従えば、切羽全体に及ぼす平均的な圧力を σ_T とすると、その大きさによっては、加圧によって掘進停止直後よりも高い圧力を地山側に作用させることにもなるが、ここでは、加圧作用による応力バランス回復の上限をシールド側からの応力を掘進停止直前と同じ状態 (図 6-19(1)) として考える。また、この加圧により、図 6-20 からわかるように、ジャッキによる加圧と同時に泥土圧も上昇する。

考察にあたっては、ジャッキによる切羽への作用圧を直接切羽に作用して地山の有効応力の上昇に寄与する分 $\Delta\sigma_B$ と泥土圧を介して作用する分 $\Delta\sigma_c$ として考える。

加圧前の応力バランスを(4)の場合と同様に、図 6-27 と同じ状態とすれば、推進ジャッ

キにより地山側には、有効応力が直接上昇する分の $\Delta\sigma_B$ と泥土圧の上昇分 $\Delta\sigma_c$ が付加的に作用することになり、これにより、地山側の間隙水圧 U_e が ΔU_e だけ、有効応力は $\Delta\sigma_{e'}$ だけ上昇してシールド側の応力と釣り合う。

この応力バランスで上昇した切羽地山の間隙水圧は、添加材注入の場合と同様に地山への水の排出がないため、すぐに消散してしまい、上昇した間隙水圧($U_e + \Delta U_e$)が周辺の間隙水圧($U_e = {}^1U_e$)と同じ大きさに戻り、切羽から先の間隙水圧を上昇させることにはならない、さらに、加圧を続けると、消失した間隙水圧分だけ地山の有効応力 $\sigma_{e'}$ が上昇することになる。その変化の過程は、(4) 1), 2), 3) の場合に対して、次のようになる。

図 6-27 の(1), (2), (3)を加圧前の状態とし、ジャッキ圧作用前のそれぞれのケースの泥土圧を σ_{c1} で、同様に初期応力から低下している地山の有効応力も $\sigma_{e1'}$ として表すと、一旦、図 6-32 (1), (2), (3)の状態となり、さらに、図 6-33 (1) (2) (3)のように変化していく。また、それぞれの過程で加圧が停止された場合には、掘進停止後と同様の経過をたどるものと考えられる。

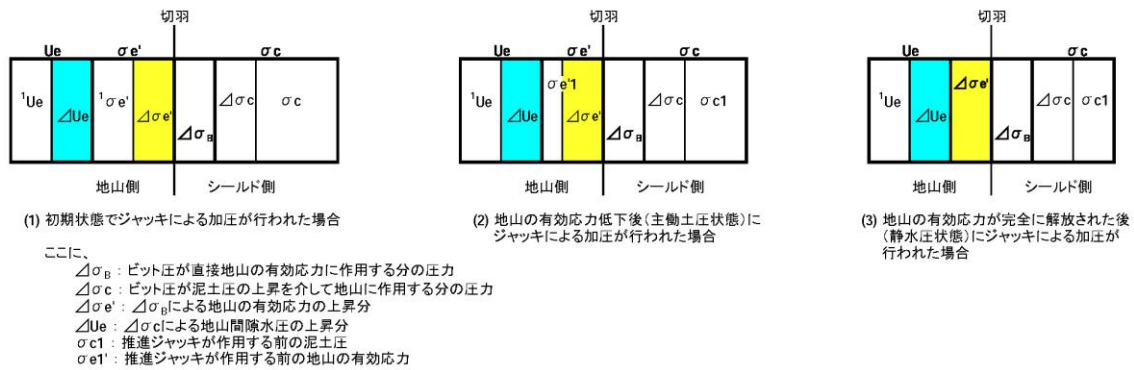


図 6-32 掘進停止中の推進ジャッキによる加圧時の切羽での応力状態

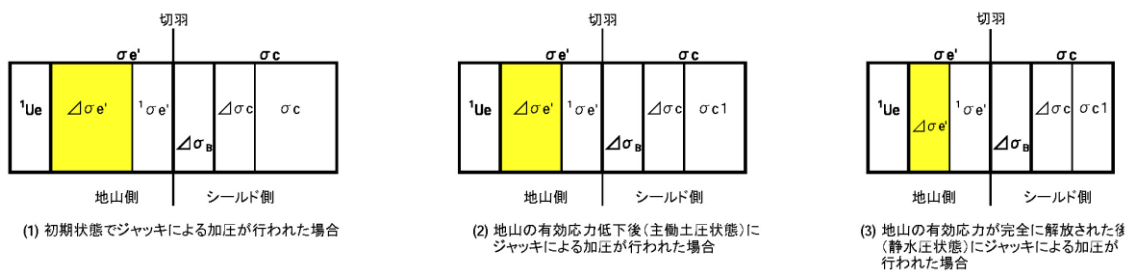


図 6-33 掘進停止中の推進ジャッキによる加圧時の切羽での応力状態
(地山の有効応力の回復)

(6) 応力バランス検討からの掘進停止中の添加材注入と推進ジャッキによる加圧の評価

掘進停止中の泥土圧の低下防止や低下した泥土圧を元に戻す目的で行われる添加材注入とジャッキ推力の作用について、泥土圧維持または上昇への寄与ならびに地山の有効応力維持、回復への寄与との観点から応力バランスの検討結果を整理すると、次のようになる。

- 1) 添加材注入もジャッキ圧作用も泥土圧の維持と回復に寄与する.
- 2) 地山の有効応力の維持に対しては、どちらも、泥土圧を維持することで有効応力維持に寄与する.
- 3) 低下した有効応力の回復に対しては、ジャッキ圧の作用は直接地山の有効応力を上昇させる機能があることから、直接的な作用と泥土圧の上昇あるいは維持を組み合わせることで寄与するものの、長期的な回復状態の維持のためには、泥土圧の維持が必要となるため、加圧を続けるか別途泥土圧を維持するための方策が必要になる.

添加材の注入は、地山への水の排出がないという環境では、地山の有効応力の維持あるいは上昇に寄与する。一方、長期的な回復状態の維持のために泥土圧の維持が必要となることはジャッキ圧の作用と同様であるが、そのために、添加材注入を継続するにあたっては、注入量が増加することによって、泥土の性状が劣化しチャンバー内に添加材が増えて泥土の流動性が増したり不均質な泥土となって地山からの水の流入を招かない状態の維持が必要になる。

一方、過剰な添加材注入圧やジャッキ圧の作用は、地山への水の排出が起こらない掘進停止中には、地山の有効応力の増大を簡単に生じさせ、地山を隆起させる危険性が高いと推定されることから、その作用圧力の大きさの管理には注意が必要となる。

6.4 瀬古T（味鋺工区）における地山陥没時の掘進管理の検証

6.4.1 検証の目的

本研究のきっかけを与えた泥土圧シールド掘進時の地山陥没事故の例について、掘進管理状況を本章で用いた切羽における応力バランスの検討を実施して、その掘進状況を検証することで、応力バランス検討の有用性を示す。

6.4.2 陥没発生前の掘進管理情報の状況

陥没発生前の掘進は、泥土圧と排土量による管理が実施されていた。他の掘進管理情報としては、推進力、カッタートルク、添加材注入圧、量と地表面沈下が得られていたが、地表面沈下には、陥没にいたる兆候と特に確認されておらず、他の管理情報からも兆候は確認できていなかった。掘進管理の基本的な考え方は、

- ① 予め設定した泥土圧の変動と排土量から、泥土圧を設定圧に保つこと
 - ② 泥土圧の変動に対しては、排土量をコントロールすることで対応すること
- とし、泥土圧変動に対しては、自動的にスクリーコンベヤーの回転数を変化させて泥土圧を変化させることにしていた。

6.4.3 陥没発生に至る過程の分析

陥没前の状況は、泥土圧が上昇し、それに伴って排土量をコントロールして排土量が増大した状況が、数リング続いていた状況であったと思われるが、測定チェックを実施していなかった泥土圧を一定にする管理の結果、図3-1に示したようにスクリーコンベヤーの回転数を増していた様子がわかる。この回転数を増して排土量を増加した結果、泥土圧が一定であったにもかかわらず陥没が発生した。

この状況を、手順を追って示すと、図6-35から図6-37のように表すことができる。

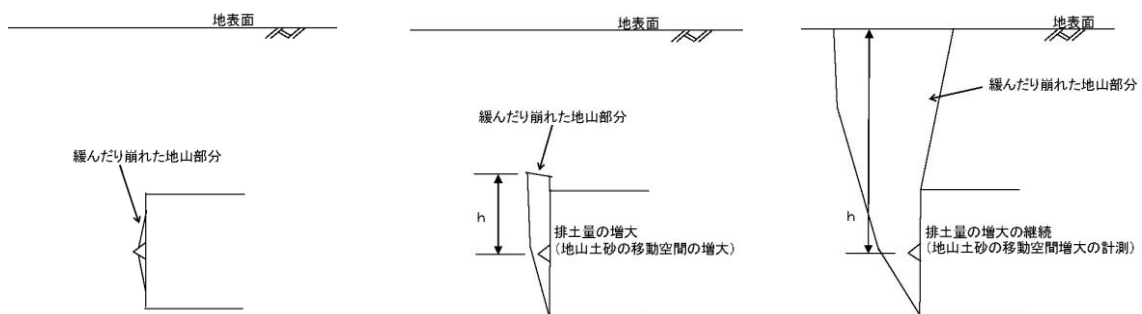


図 6-35 一般の掘削状態 図 6-36 排土量が増大した場合 図 6-37 地山陥没が生じた状態

$$\begin{aligned} & {}^1U_e + {}^1\sigma_{ei}' = \gamma \cdot h = \sigma_c < {}^1U_e + {}^1\sigma_e \\ & {}^1U_e + {}^1\sigma_e > {}^1U_e + {}^1\sigma_{ei}' \\ & {}^1U_e + {}^1\sigma_e: \text{静止状態の水圧と有効応力} \\ & {}^1\sigma_{ei}' \text{は初期状態の水平方向の有効応力} \end{aligned}$$

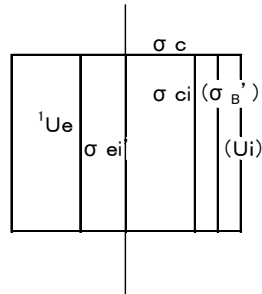
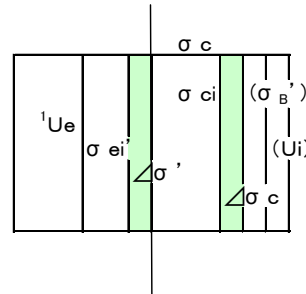


図 6-38 初期設定時の応力状態



ここに、 $\Delta\sigma'$ は地山からの土圧の増分

図 6-39 泥土圧上昇時の
応力状態

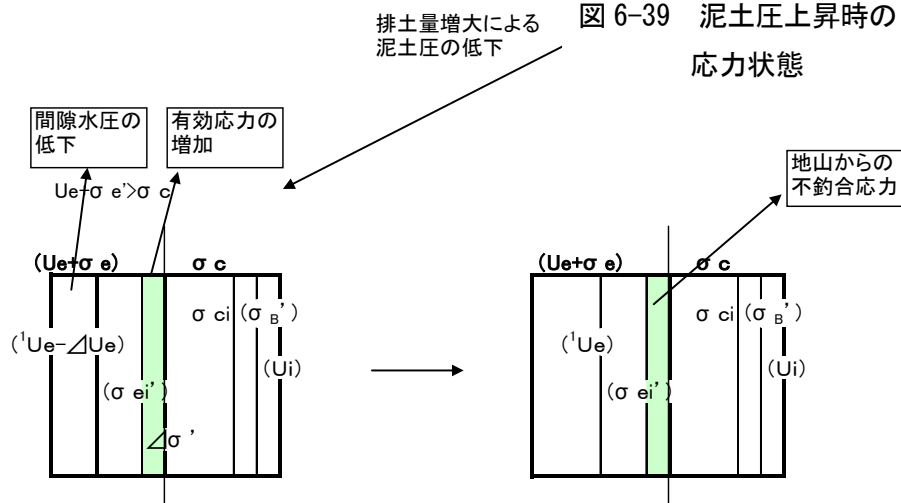


図 6-40 地山応力変化時の
応力状態

図 6-41 切羽の安定が崩れる時の
応力状態

- ① 通常の掘進が行われていた状態では、切羽での地山とシールドの応力バランスから次のように考えられる。ここでは、シールド側からの作用力としては、泥土圧（添加材注入圧、ビット圧を含む）が作用しており、地山側からは水圧と土圧が作用している状況である。

このとき、設定した泥土圧は緩み土圧と間隙水圧に対応するもので、初期地山の静止状態の土圧+間隙水圧より小さい状態であった。この状態は、切羽におけるシールドと地山の掘削状況としては、図 6-35 に示した一般の掘削状態、応力バランスとしては、図 6-38 のように表すことができる。

この掘進を続けている場合には、推進力は設定した泥土圧が維持できるように受動的に変動する形となっており、地山状態の変化や掘進速度の変化がなければ、変動しないコントロールがなされていた。そのような状態で、泥土圧が上昇する状態が発生した。

- ② 泥土圧の増加は、掘進速度に変更がなく、泥土の性状にも変化がない状況からは、地山からの土圧の変化と考えられ、そのときの応力バランスは図 6-38 から図 6-39 への変

化として表される。また、状態変化後の地山とシールドの接触環境は、図 6-36 の状態と考えられ、掘削にともなって、地山の崩れ、緩みの範囲が拡大した状況に該当する。

この状態で、排土量の増大が自動的に行われると、緩んだり崩れた切羽部の土砂がチャンバー内に簡単に入り込む環境（空間）が掘削土量に対して過剰な排土によって作られることから、排土量を増やす前に比べて泥土圧が低下して、その分地山の間隙水圧が低下した図 6-40 に示す応力バランスが発生することになる。

- ③ この図 6-39 から図 6-40 への応力バランスの変化は、緩んだり崩れていない地山に対して、泥土圧低下分の応力解放を生じさせることから、鉛直方向の有効応力を増大させるとともに、切羽面での応力バランスが図 6-41 のように変化し、切羽側からの作用応力とシールド側の応力にアンバランスが生じて切羽の安定が崩れる状況が発生する。
- ④ この応力のアンバランス状態で、排土量の強制的な増加分だけチャンバー側に土砂、間隙水の移動空間があるという状態が、図 6-36、図 6-37 への変化として示すような、地山側の更なる崩れ、緩みの増大を引き起こしていくことになる。図 6-36、図 6-37 の状態では、切羽でシールド側に作用する圧力は、崩れて緩んだ流動化した土砂の圧力と考えられ、その大きさは、緩んだり崩れた地山の単位体積重量を γ_1 、高さを h とすると、単位体積重量が γ_1 で水頭が h の流体圧に等しいと考える。

そのとき、地山の崩れ、緩みによる切羽部での地山からの応力は、図 6-37 を想定して考えると、図 6-42 のように示され、管理圧として設定した泥土圧より大きいことから、更なる排土量の増大をコントロール側に指示することとなり、上記の過程が繰り返されることで、崩れ、緩みの継続によって図 6-43 に示すような切羽部での状態を発生させたものと考えられる。実際のシールド掘進では、数リング程度前からこの図 6-36 の状態ができやすい掘進管理状態が継続していたと考えられ、切羽より 3～4m 後方を中心とする陥没が発生した。

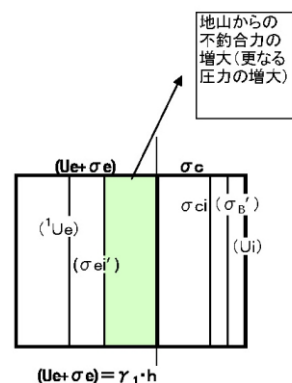


図 6-42 地山の緩みによる
応力状態

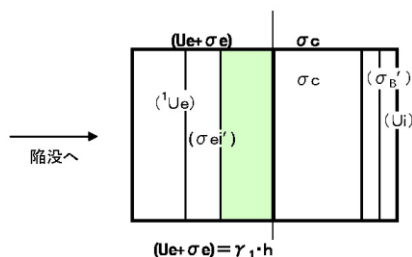


図 6-43 地山の緩みの継続による
応力状態

6.4.4 施工管理方法の応力バランスからの検証

6.4.2 で示した陥没の過程を考慮して、味鉢工区の掘進管理方法を応力バランスから考察すると図 6-44 のように説明できる。図 6-44 では、縦軸に泥土圧あるいは地山からの圧力（間隙水圧＋有効応力）、横軸に図 6-36 と図 6-37 に示した緩み高さを示す。管理すべき泥土圧は各土圧状態に対して、 σ_{cy} 、 σ_{cs} 、 σ_{ca} で示される。図上の矢印で、その点の状態を示す応力バランスを記述した図番号を示した。

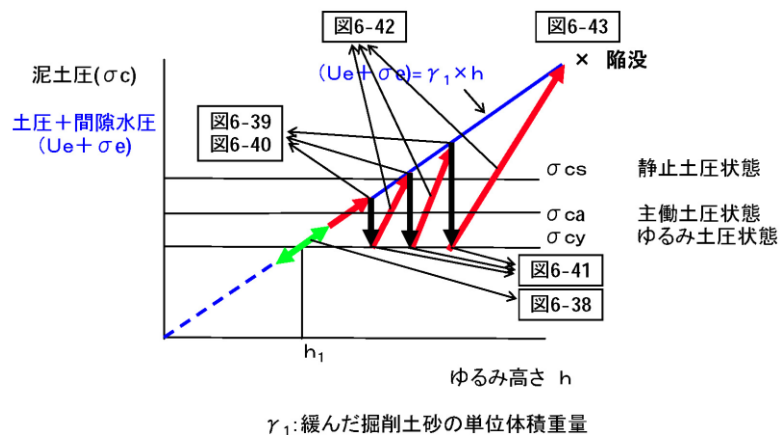


図 6-44 掘進管理方法の応力バランスからの考察

図 6-36、図 6-37 の切羽模式図を念頭に、地山からの圧力を算定すると、まず緩んだ地山と間隙水の領域の高さとその領域の単位体積重量を元にして、前述の過程に従うとすれば、掘進中の泥土圧の変動は、 $(Ue + \sigma e) = \gamma_1 \times h$ の直線上を動くことになり、一般の安定した掘削状態の泥土圧の変動は、緑の矢印で示される。その過程で泥土圧の上昇が発生する場合は、線上の泥土圧上昇方向の矢印で示され、その上昇に対して排土量を増大させて泥土圧を下げる作用は、下向きの矢印で示される。

泥土圧の低下によって、さらに泥土圧が上昇する過程は、赤色の矢印で表され、赤矢印と黒矢印が交互に繰り返されることで、段々泥土圧が上昇して、最終の応力バランスとして図 6-43 の状態が発生するとともに、そのときの切羽状態の模式図が図 6-37 のようになる。

この図のような、切羽における地山とシールドの応力バランスを検討することにより、泥土圧の増大、排土による泥土圧のコントロール（低下）の繰り返しが、結果的に地山の崩壊を引き起こすことが容易に認識できることから、味鉢工区で採用した掘進管理の考え方が適切でなかったことがわかる。また、切羽での応力バランスの検討を掘進情報に照らし合わせて考えることで、適切な管理が行われているかどうかの評価もできる。

6.5 結論と今後の課題

土圧式シールド工法における施工時の切羽における応力バランスについて、第4章、第5章で示した現場観察と計測結果をもとに有効応力の原理に基づく考察を行い、シールド機による掘進中の地山の切削、推進、掘削土砂の取り込み、添加材の注入の状態と掘進停止中の状態を示した。さらには、この応力バランスの検討から掘進停止中の泥土圧維持を目的に実施される対応策の適否の検討と陥没事故発生箇所の掘進管理状況の評価を実施した。

この考察に用いた基本仮定は、①地山の挙動は有効応力の原理に従うこと、②チャンバー内の土砂は土水一体となった挙動特性を持つことという2点であり、それに地盤内の土中水の浸透と泥土の構造特性を加味しながら土圧式シールドの施工過程における地山へのシールドの作用を分析し、それに対する地山の応答を考えることで考察を進めた。①の地山の挙動が有効応力の原理に従うという考え方は土質力学の基本的な考え方であり、②のチャンバー内土砂が土水一体の挙動を示すという仮定は、土圧式シールド工法における切羽安定の根幹をなすチャンバー内泥土の理想的な性状を端的に表わす第5章で示した泥土の特性である。

さらに、ここで加味した泥土の構造特性は、実際の施工において確認されている①良好な粒度組成の軟らかい飽和粘土は添加材なしで攪拌、混合するだけで良質の泥土になること、②加圧された泥土は透水性が極めて小さいという性質を反映しているとともに、第4章、第5章で示した加圧を解除された泥土の圧力変動も反映したものとなっている。また、第5章で示したように①と②の特性は軟弱粘土を攪拌、混合してできる泥土を考えたとき、このような性質を持った泥土は切削土を容易にチャンバー内に取り込み、新たに攪拌、混合して泥土化する過程をスムーズに行える特性を持っており、土水一体の泥土性状がシールド掘進中に推進力によって生じる地山への泥土圧の作用力を切羽において有効に地山に伝える機能を発揮するものである。

一方、このような泥土の性状は、粘性の高い添加材を注入してチャンバー内で切削土砂を泥土化した場合の泥土の性状とも一致している。さらに、シールドの推進力が生む地山への加圧を担うビット圧と泥土圧によって、シールド掘進中に地山内の水や添加材に含まれる余剰水が地山へ排出されるという実態を生じさせる条件としても有効に機能するものである。

また、土圧式シールド掘進に伴い地山が有効応力の原理に従って挙動しているという仮定は、第4章で示した地山挙動を反映したものであり、ここで用いた2つの仮定に齟齬がないことが示されている。しかしながら、チャンバー内泥土の性状としての土水一体という考え方は、時間経過との相対的な関係と加圧状態にあるということにより土水一体とみなせるという意味である。軟弱粘土を攪拌混合して作る泥土は有効応力の原理に従う土水分離の材料であるものの、添加材を用いて作られた泥土は、厳密な意味では、その配合や

泥土化の状況により構成成分の割合が異なることからその性状も第5章で示したビンガム流体や粘弾性体の特性をもつ材料として表すことができると言える程度で、その特性についての物理化学的研究は充分行われておらず特定できていないのが現状と言える。

ここでの考察により得られたことをまとめると次のようになる。

- (1) 土圧式シールドの掘進に伴う地山の挙動や切羽で発生する事象とその発生メカニズムが、地山挙動が有効応力の原理に従うことおよびチャンバー内の泥土の性状が土水一体のものと仮定し、シールドから地山への作用力をシールドの施工過程に応じて分析した結果に基づいて、切羽における応力バランスの変化を起因とするシールドからの作用とそれに対する地山のリアクションとして考察すると、概ね矛盾無く説明できること

また、その説明できる事象の主なものは、

- ①切羽でシールド側から地山に作用する泥土圧やビット圧、添加材注入圧等の増減によって地山の間隙水圧と有効応力が増減する現象
- ②土圧式シールドの掘進時に掘削土に含まれる間隙水と添加材の余剰水が切羽におけるビット圧、添加材注入圧と一体となった泥土圧によって地山に排出される現象
- ③掘進停止中の切羽での作用力の低下に伴う地山の間隙水圧の低下と有効応力低下のメカニズム
- ④掘進停止中の添加材注入やシールドジャッキの再加圧の作用メカニズムとその作用特性

である。

- (2) 土圧式シールドにおいては、所定の性質を有する適切な泥土を用い、泥土圧を地山の初期応力状態以上で施工管理を行えば、シールド掘進中も掘進停止中も切羽における有効応力の初期応力状態からの低下を有効に防止できるメカニズムが機能していること
- (3) 土圧式シールド施工とこれに伴って発生する地山挙動が、シールド施工を切羽への作用力の変化として分析し、泥土の性質と組み合わせて切羽での応力バランスを検討することで、そのメカニズムを説明できること
- (4) 切羽における応力バランスの検討を行うことにより、土圧式シールドの施工時にシールド側から地山へ及ぼす作用が地山に与える影響を一般的に類推することが可能となり、シールド施工方法や施工管理方法の良否が評価できる手法になりうること、さらに、実施工における施工のトラブル原因の究明や施工の改善効果が予測でき、適切な施工方法や施工管理方法の選択が可能になること
- (5) 第4章と本章における分析の結果から、泥水式シールドにおける切羽安定についての分析も本章で用いた方法により可能であること、さらに泥水式シールドの安定には泥膜を介した泥水圧の作用ばかりでなく切羽付近の地山の透水係数と地山への

水の連続的な浸透が大きく寄与していることが推定され、実際の施工では必ずしも泥膜の十分な形成が必要でないことも説明できると予見されること

参考文献

- 1) 平手知：超低土被り条件下におけるシールド施工ーつくばエクスプレス 常磐道 Tー，日本鉄道建設公団第 38 回技術研究会講演概要集，2002 年 10 月
- 2) 小野顕司，清水一郎，西田義則，廻田貴志：離隔 30cm 以下の併設泥土圧シールドーつくばエクスプレス つくばトンネルー，トンネルと地下，2004 年 2 月

第7章 解明された地山挙動メカニズムの施工への反映

7.1 はじめに

第4章、第5章、第6章において、帯水砂質地山における土圧式シールド施工時の地山へのシールドの作用と地山挙動の関係を施工時の現場計測と掘進管理情報をもとに、泥土と泥土化に対する考察と切羽における地山側とシールド側の応力バランスの検討を実施してきた。その結果、シールドの地山に対する作用とそれに伴う地山挙動について多くの知見を得た。

本章では、これらの知見を土圧式シールドの施工に反映させた施工管理とマシン装備に対する考え方を整理して示す。その手順は、まず①良好な掘進状態におけるシールドからの地山への作用とそれに対する地山挙動を整理する。続いて、②として①との関係から掘進管理の鍵を抽出して、その鍵に関する重要な管理項目に対する管理の基本的な考え方と地山間隙水圧測定を利用した掘進状況を確認する方法を示す。③として、掘進管理の全容を掘進中と掘進停止中に分けて解説するとともに、他の有用な掘進管理情報の活用方法も示す。④として、③で示した掘進管理の全容と地盤変位の関係を具体的な施工に合わせて示すとともに、日常管理に最も有効な方策になりうる掘進開始時の管理方法を述べる。最後に、施工と施工管理を考慮したシールドマシン装備についての考え方を示す。

7.2 良好な掘進状態を想定した地山への作用と地山挙動

第4章から第6章までの考察をもとに、適切な泥土性状と泥土圧を確保した良好な掘進状態を想定したシールド側からの地山への作用と地山で発生している現象、そのときの切羽およびチャンバー内の状態の相関関係を、シールド掘進中と掘進停止後に分けて模式的に示すと、図7-1と図7-2のようになる。7.2.1、7.2.2では、掘進中、掘進停止後におけるこれらの相関について解説する。

さらに、7.2.3では、掘進停止継続中に行われる泥土圧低下防止のための添加材注入とジャッキ圧作用と地山挙動について、図7-3をもとに解説する。

7.2.1 掘進中のシールドの作用と地山挙動

掘進中のシールドの作用と地山挙動の関係を、図7-1に従って述べると、次のようになる。

なお、下記の過程は同時に混在して生じる可能性が高い事象を、あえて経時区分したものである。

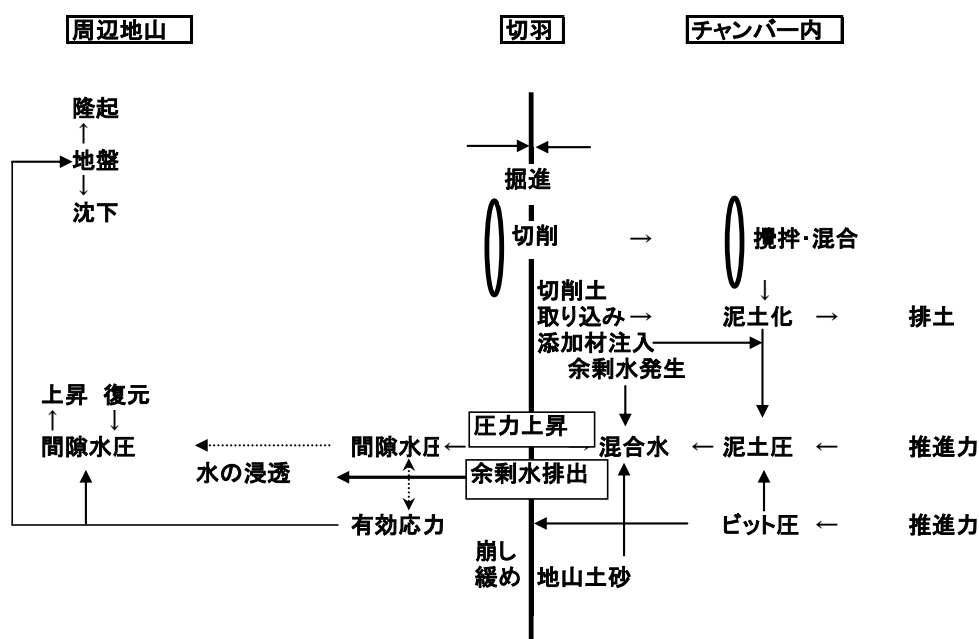


図 7-1 掘進中のシールドの地山への作用と地山挙動の相関図

- ① 掘進のための推進力がシールドジャッキにより加えられる。
- ② 推進力によって切羽には、泥土圧とビット圧が作用することになる。
- ③ カッタースポークが回転して、カッタービットやフィッシュテールにより地山切削が始まり、掘削土砂のチャンバー内への取り込みと取り込みスペースの確保のために、チャンバー後方、下部からの排土が始まる。同時にフィッシュテールやカッタービット部から泥土化のため添加材が注入され、チャンバー内で攪拌混合が始まる。
- ④ 掘削土砂は添加材と攪拌混合され、チャンバー内を後方に進み泥土化が進む。泥土化が進む過程で、泥土化に用いられなかった地山間隙水が余剰水となって、切羽付近に残る。
- ⑤ この余剰水は泥土圧、ビット圧、添加材注入圧を受けて、圧力が上昇する。
- ⑥ シールドの掘進は不透水の塊である泥土の前進とも言え、その前進に伴って、余剰水の圧力が上昇し、余剰水は透水性の高い地山側にチャンバーから排出される。
- ⑦ 切羽付近は、この余剰水、新たな切削土砂と地山間隙水、および添加材がカッターの回転に伴って、混合された混合水状態になっており、泥土圧、添加材注入圧、ビット圧を受けて圧力が上昇している状態にある。地山切削は、必ずしも理想的にビットが地山を削る状態ではなく、ビット圧等によって地山を圧壊させたり、緩ませたりした状態にあり、その状況によっては、切羽部のこの混合状態部分の成分構成は様々に変化しうる。
- ⑧ 地山への余剰水の排出は、地山の透水性等の性質により、単位時間あたりの排出量と排出に必要な水压が変化する。連続的な掘削状態では、良好な泥土状態を確保するた

めには、この余剰水をすべて排出することが求められる。したがって、地山の透水性と余剰水量に応じた水圧を発生させる泥土圧が求められる。このため、泥土圧は、必要な余剰水圧以上の圧力が必要となる。

- ⑨ 排出された余剰水は、地山内に浸透していく。浸透は、連続的に排出される水によって掘進中は継続的に続き、一定速度の掘進中は、変動はあるものの、ほぼ定常的な状態の浸透が地山に生じている。
- ⑩ 水の浸透は、浸透水が流れている地山に間隙水圧の上昇を発生させ、その間隙水圧の上昇に伴って、地山は隆起し、間隙水圧の低下に伴って復元、沈下する。このとき地山の水平変位も間隙水圧の変動と強い相関関係をもって発生する。
- ⑪ 掘進中は、①～⑩の状況が継続する。

7.2.2 掘進停止後のシールドの作用と地山挙動

掘進停止後のシールドの作用と地山挙動の関係は、図7-2に従って述べると、次のようになる。

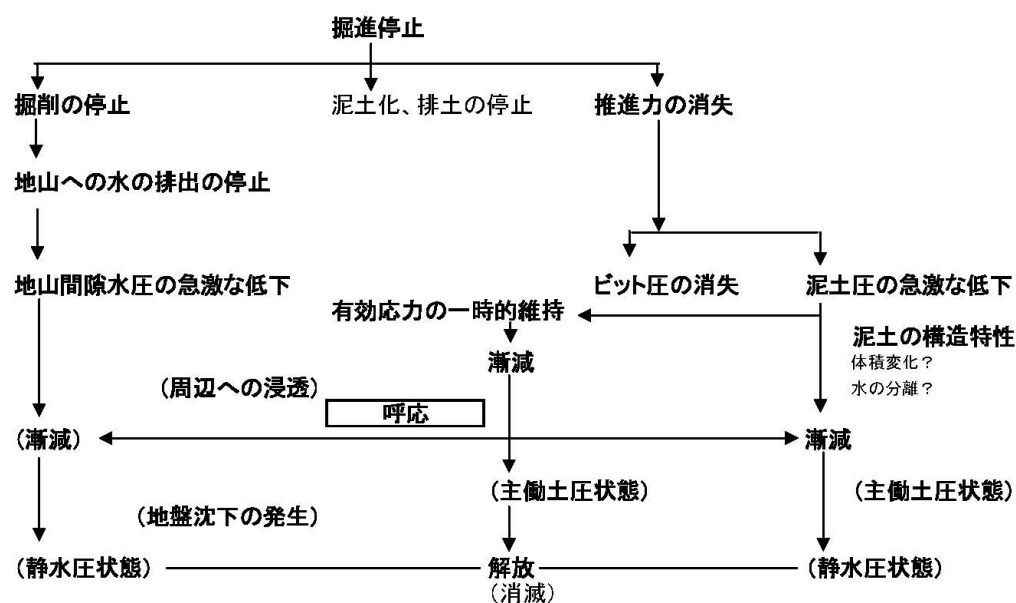


図7-2 掘進停止後のシールドの地山への作用と地山挙動の相関図

- ① シールドの掘進停止は、推進力の消失、ビット圧の消失であり、泥土圧力の発生源の消失である。さらに、地山掘削の停止であり、添加材注入、泥土化、排土の停止でもある。
- ② 掘削の停止、添加材注入、泥土化、排土の停止は、掘削土から泥土化の過程で発生する余剰水の消失であり、地山への余剰水の排出の停止である。地山への水の排出が停止されると、地山内での浸透に対応する圧力水の供給が無くなることから地山内の間

隙水圧は低下する。

その水圧低下は、2段階の過程を経る。掘進停止直後に一旦、急激な低下を起こしたのち、残りの過剰間隙水圧分が緩やかに低下する。この間、地山変位も復元し、沈下を続ける。

- ③ チャンバー内の泥土も、その圧力源が消失することで、完全弾性体やニュートン流体では、すぐに圧力が解放されることになるが、泥土はその物理特性から、すぐにはその圧力を完全には解放しない。泥土圧の低下過程は、地山間隙水圧の低下と同じく、停止直後の急激な低下を起こし、以後緩やかに低下するという2段階の過程を経る。
- ④ 掘進停止直後の泥土圧の急激な低下と地山間隙水圧の急激な低下が生じても切羽面では、一時的には掘進中の切羽面に垂直方向（地山水平方向）の有効応力が維持されることになる。その後、地山の自立性が維持されている場合には、地山間隙水圧の低下に応じた泥土圧の低下により、水平方向の地山有効応力の一部は解放されることになる。

さらに時間経過とともに泥土圧は地山間隙水圧に呼応して低下し、いずれも、静水圧まで低下する。この過程で、地山間隙水圧の低下により、地山の鉛直有効応力は増加することから、地盤沈下が生じることになる。

また、地山が自立しない場合には、泥土圧は地山からの水平有効応力の作用を受けることになるが、地山間隙水圧の低下に応じて、泥土圧も低下することになることから、泥土が保持できる地山水平有効応力分は低下することになる。これに伴い、地山がチャンバー側に変位するようになり、地山の沈下が生じることになる。

7.2.3 掘進停止中のシールド側からの作用と地山挙動

掘進停止中に泥土圧の低下を防止する目的で実施される、添加材注入やジャッキ圧作用にとともなう地山挙動については、図7-3に従って述べると次のようになる。

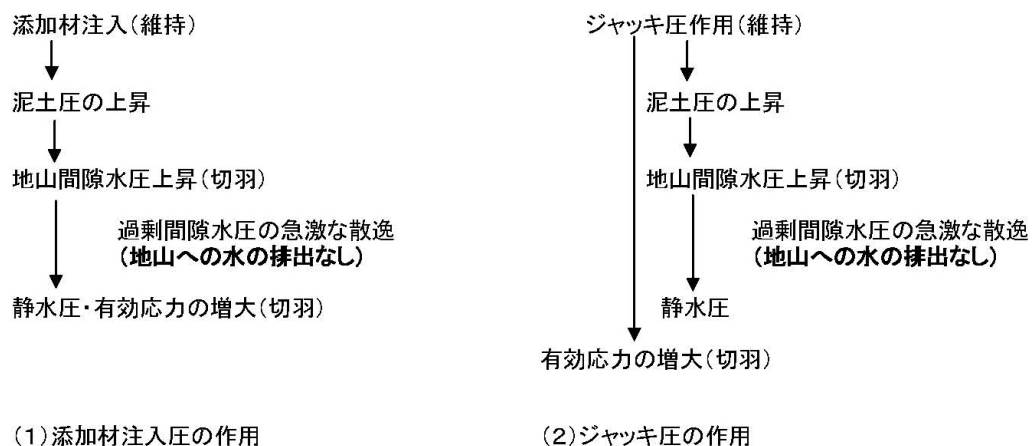


図7-3 掘進停止中の作用

- ① 泥土圧低下中に添加材注入が行われると、泥土圧が上昇する。その上昇量は、必ずしも添加材注入圧に一致しないが、強い相関を持って、泥土圧が上昇する。
ジャッキ圧の作用も添加材注入と同様、泥土圧を上昇させるほか、直接切羽面に作用して地山の水平方向有効応力を増大させる。
- ② 上昇した泥土圧は、地山の切羽面に作用するが、掘進中と異なり、地山への水の排出が行われなため、地山の間隙水圧を上昇させるのは、接している切羽地山だけで、周辺地山の間隙水圧は上昇しない。
- ③ この切羽地山の間隙水圧の上昇もわずかな時間だけで、周辺地山への過剰間隙水圧の消散が急激に発生して、地山の切羽に垂直方向の有効応力が増大する。
- ④ したがって、添加材注入もジャッキ圧作用も継続的に実施され、上昇した泥土圧状態が維持されれば、切羽における地山の有効応力の解放を防止する機能を有する。一方、維持されなければ、作用前の状態に戻る。

7.3 良好な掘進状態を作るための掘進管理の鍵

7.3.1 良好な掘進状態を作るための要件

7.2.1 から 7.2.3 で述べた良好な掘進状態を作るための要件を、7.2.1 から 7.2.3 をもとにして、掘進中、掘進停止後に分けて記述すると次のようになる。

(1) 掘進中

- ① 掘削土を添加材と攪拌混合して、必要な機能を果たす性状の泥土を作ること
- ② 地山へは常に掘削土の泥土化に使われなかった余剰水をすべて地山に排出するのに必要な泥土圧を常に保つこと

(2) 掘進停止中

- ① 掘進停止直後の泥土圧低下を極力防ぐこと。
- ② 掘進停止後の緩やかな泥土圧の低下を防止し、地山の応力解放が生じないような応力レベルに保つこと

これらの要件のうち、泥土圧の役割が帯水砂質地山では、余剰水の排出にあることは、新しい泥土圧に対する考え方と言えるものの、それ以外は、泥土圧シールド工法の掘進管理にとって決して目新しいことではないように思われるが、第4章から第6章までの考察によって、それらの重要性和その意味が明らかになったことを踏まえ、以下ではこれらの要件達成のための掘進管理の鍵を述べる。

7.3.2 良好な掘進状態を作るための掘進管理の鍵

(1) 掘進中の管理の鍵

1) 必要な機能を果たす性状の泥土を作ること

掘進中の達成しなければならない要件は、まず、「必要な機能を果たす性状の泥土を作ること」である。その求められる機能と性状を掘進管理に直接関係する事項として再掲して示すと、次のようになる。

ア) 所要機能

- ①帯水層における地山からチャンバーへの地下水の流入の防止
- ②地山のスムーズな切削と掘削土砂のチャンバー内への取込
- ③既存泥土と掘削土砂の円滑な攪拌混練
- ④取込と混練過程における余剰水の地山への排出
- ⑤泥土のスクリーコンベヤーによるスムーズな排出
- ⑥排土量の制御に対する泥土圧の的確な反応
- ⑦泥土圧力の地山への有効な伝達

イ) 所要性状

- ①塑性流動性
- ②不透水性
- ③充填性
- ④応力解放が発生しにくい物理特性

所要機能の①、④、⑥、⑦は、第5章で述べた泥土の土水一体の性質が発揮する機能であり、その性状としては、不透水性として表される。また、所要機能の②、③、⑤は、大きくは塑性流動性という性状で代表される。所要性状の③にあげた充填性は、塑性流動性と不透水性という性状では表現できないチャンバー内が泥土で常に充満する状態を念頭に入れた性状として挙げた。さらに、第5章で示した外力作用の停止に伴う内圧としての泥土圧の解放が生じにくいという特性については、所要性状の④応力解放が発生しにくい物理特性として示した。

塑性流動性という性質は、現段階では、具体的な物理指標で示すことができない²⁾が、塑性流動性、不透水性が確保された性状を示す泥土状態の維持が、良好な掘進状態を作るための施工管理の第一前提になると考える。

2) 掘進中に泥土化に使われなかった余剰水をすべて排出するために必要な泥土圧を保つこと

この余剰水をすべて排出するのに必要な圧力は、地山の透水係数や貯留係数等で示される透水性によって異なるものであるとともに、掘進速度に伴って決まる余剰水量に強く関係している。さらに、泥土圧は、掘削土量に対する排土量の相対的な関係に

よって敏感に変化するものであることから、掘進速度、排土量の一体的な管理が必要となるとともに、装備した推進力に対しても、この泥土圧発生への十分な能力が求められることになる。

この余剰水の地山への排出状況は、地山内の間隙水压変動から確認することができるが、切羽の移動に合わせて日常的に地山間隙水压を測定することは実態的には困難な作業になる可能性があるので日常管理は排土量管理で行い、それを確認、補完する意味で、地層の変化や厳密な地山挙動の抑止が求められる施工管理を必要とする場合には、排土量管理に加え地山間隙水压測定による余剰水の排出状況を確認することが必要である。

(2) 掘進停止中の管理の鍵

1) 掘進停止直後の泥土圧低下を極力防ぐこと

掘進停止後に泥土圧が低下する原因は、掘進停止に伴う推進力の消失と合わせて泥土の特性による圧力低下が原因である。泥土圧の低下は地山有効応力の解放につながり、その解放による周辺地盤の沈下を発生させる原因になること、さらに、地山の自立性を損ない、地山に緩みや崩れを発生させることにもなりかねない。したがって、この掘進停止に対して、できるだけ停止直後の泥土圧の低下を防止するための処置が求められる。

第5章で述べたとおり、掘進停止直後の急激な泥土圧低下には、泥土の物理的な特性が重要であり、その特性を支配する要素として添加材の性質が重要な役割を示すことから、泥土化に用いる添加材の選定にあたって、添加材そのものの性質を考慮した選定を行うことも大切である。

2) 掘進停止後の緩やかな泥土圧の低下を防止し、地山の応力解放が生じないような応力レベルに保つこと

掘進停止後の緩やかな泥土圧の低下を防止することは、掘進停止直後の泥土圧の急激な低下の防止とともに、周辺地盤の沈下防止と地山の自立性低下による異常事態の発生を防止するために必要な管理事項である。さらに、この緩やかな泥土圧の低下には、掘進停止直後の泥土圧の低下同様、泥土の特性、すなわち、泥土化に用いられる添加材の性質が大きく関与していることから、ここでも、同様に、泥土化に用いる添加材の選定にあたって、添加材そのものの性質を考慮した選定を行うことが重要である。

掘進中の泥土圧は、余剰水の排出で決まるのに対して、掘進停止中の泥土圧は管理すべき値を設定しなければならない。したがって、掘進停止中の管理に当たっては、適正な泥土圧の設定が管理上重要な事項となる。

7.3.3 掘進管理上の重要事項

7.3.2 において示した掘進管理の鍵を達成し、良好な掘進状態を作るための重要事項として、次の4つの事項を挙げることができる。さらに、良好な掘進状態を的確に把握するための重要事項としては、地山間隙水圧測定の活用を挙げることができる。本項では、これらの重要事項について、関連する掘進管理事項とともに、施工管理の考え方を述べる。

- ①泥土性状管理
- ②掘進速度管理
- ③泥土圧管理
- ④排土量管理
- ⑤地山間隙水圧測定の活用

(1) 泥土性状管理

前項では、泥土圧シールド工法において、ある意味で常識であるはずの泥土性状管理を掘進中の管理の鍵の第一番目に挙げた。これは、泥土性状が適切でなかったことがこの研究のきっかけとなった第3章で挙げたひとつの事故の主要な原因であるばかりでなく、泥土圧の地山への作用、チャンバー内のスムーズな土砂の移動と排土、地山からの水に対する防護、泥土圧の測定・管理に至る重要な管理を円滑に進める大前提が「適切な泥土性状が確保されていること」であることによる。このことは、第2章から第6章までの検討の大前提でもあるが、掘進開始直後や砂礫地盤の掘進ばかりでなく、硬質粘土の掘進においても、適切な泥土性状が確保されていない場合には、トラブルの大きな原因になる。適切な泥土の性状を特定する物理指標がないことも、泥土の性状管理を難しくしている一因と考えられるが、塑性流動性の確保、土水圧一体の作用を示す不透水性を確保できる泥土性状の管理は、最重要の管理である。

帯水砂質地山における泥土性状に最も影響を与える要素は、添加材の性質、注入量、攪拌混合の程度である。これらの要素は、帯水砂質地山ばかりでなく、他の粒度組成の地山においても同様である。

添加材の性質については、塑性流動化、止水性の観点から研究され、塑性流動化と止水性を決定する性質として選定されている現状にあるが、本研究の成果の一つである掘進停止直後から掘進停止中の泥土圧低下が小さい特性を泥土に与える添加材の今後の研究が必要と言える。添加材の性質は地盤の粒度組成など対象とする地盤特性との適合性が重要であり、現地盤の材料での配合試験や施工経験を参考に、添加材の選定を慎重に行うとともに、掘進中においてもその適合状況を的確に管理することが必要である。

一方、添加材の注入量は、帯水砂質地山では、地山の間隙水に置き換わって土粒子の間隙を埋めることによって泥土が形成されることから、置換できる地山間隙水量に相当する添加材注入量が基本と考えられる。この量は地山の有効間隙率に相当する量であると既存

の研究成果¹⁾で得られているが、掘削土は泥土化の過程で、間隙率が増加することから、この量を基本に、泥土の性状が劣化しない範囲の注入量とすべきと考えられる。

さらに、攪拌混合の程度は、攪拌翼の設置状況、カッタースポーク回転速度、掘進速度、添加材注入量との関係で決まる。特に、攪拌翼の設置はマシン設計時に決まり掘進管理時ではコントロールができない。また、カッタースポークの回転速度は最高速度が設定され、一般に速度の変更は行わない。したがって、攪拌混合の程度は、掘進速度と添加材注入量で管理されるのが一般的で、両者をコントロールして必要とする機能を備える泥土ができるように十分な攪拌混合を行う必要がある。それ故に攪拌翼の種類、数、配置には十分な検討が必要である。

泥土の性状管理は、目視や手触りを中心に、現段階では、次のような事項の確認によって管理するのがよいと考える。

- ① 排土が分離していない。(添加材の質及び注入量が妥当 攪拌が的確)
- ② 地下水の浸入による泥土圧の急激な低下がない。(不透水性を確保)
- ③ 掘進中は、ゲートが解放状態で排土による泥土圧制御が行える。(円滑な排土地山の押出しなし)
- ④ カッタートルク・アジテータトルクの変動が小さい(添加材注入が適切、攪拌妥当)
- ⑤ 泥土圧の変動幅が設定範囲内である(円滑な制御)
- ⑥ 掘進速度が25mm/mm以上である(間隙水 適切に排出 マシン装備妥当)

(2) 掘進速度管理

掘進速度は、(1)の泥土性状管理の一つの要素であるとともに、シールド掘進で確保すべき施工性の最大目標である。さらに、本研究の結果、掘進速度から決まる単位時間の地山掘削土量とそれに含まれる間隙水をすべて排出することが、良好な掘進状態を作る要件となることが明らかになったことから、掘進速度管理は、達成すべき施工の目標の管理としての重要性ばかりでなく、円滑な掘進のための管理要素としての位置づけが明確になった。これまで、カッタートルクの変動に合わせて、掘進速度を調整して円滑な掘進となるようコントロールは行われてきたが、掘進中の余剰水の地山への排出で泥土圧が決まる。そのため、掘進速度と泥土圧が、掘削土の間隙水を主体とする余剰水の地山への排出と地山の透水特性を介して密接な関係を有することが明らかとなったことから、掘進管理の最初の決定要素として掘進速度が位置づけられることになる。

一方、掘進速度は排土量とのバランスによって泥土圧をコントロールする手段となることから、排土量との一体的な管理が求められることは、前項で述べたとおりである。

(3) 泥土圧管理

「チャンバー内泥土の所要の圧力」は、基本的には施工するトンネルに求められる課題が何かによって異なると考えられる。

一般的に、トンネルの施工に際しては、「地山への影響を最小限に抑え、地盤変位を極力抑止すること」を必ずしも必要とせず、「切羽の安定状態を保つ」ことが課題となることも多いと思われる。しかし、シールド工法による施工は、その大半が都市部において行われることから、地盤変位の制約のもとに施工管理を行うことがほとんどである。

「切羽の安定を保つ」とは、「切羽の不安定状態すなわち崩壊の危険性をもたらす可能性のある状態を回避するよう施工の管理を行う」ことであり、「地盤変位の抑止」とは当然ながら、「切羽安定保持がなされた上に、さらに地盤変位を制約内に収める」ということであり、都市土木においては、余程の大深度か、または硬質地盤における施工を除いては、ほとんどの場合、地盤変位を極力抑止することは不可避な課題である。

「地山への影響を最小限に抑える」という課題のもとでの所要の圧力とは、極論するならば、「掘削前の地山の応力状態をチャンバー内に再現する圧力」との定義付けが考えられるが、実態的には、「チャンバー内泥土圧を地山の静水圧と静止土圧状態以上に保つこと」を意味する。したがって、管理すべき泥土圧が対象のトンネル施工に求められるこの2つの課題のいずれに対応する泥土圧として設定されるべきかを考えることが泥土圧管理の第一に挙げられる。

次に、チャンバー内泥土圧が所要の圧力を保持しているか否かの確認のためには、チャンバー内泥土圧を直接測定することが必要であり、掘進時、掘進停止時を問わずチャンバー内泥土圧の状態を継続的に計測し、分析することが極めて重要である。近年、チャンバー内泥土圧の計測について、可動攪拌棒やカッタースポーク部に土圧計を設置して、可動点においての計測が試みられる事例も出てきているが、一般的には土圧計は固定点における測定が行えるよう装備されていることから、チャンバー内全体での圧力確認のためには、チャンバー内全域での泥土圧の状態が把握できる個数と配置が必要である。

さらに、チャンバー内において所要の圧力を維持することが地山への影響を最小限に抑えるために重要な要素であることから、掘進管理上もこの状態を確認し、掘進方法の検討・必要な対応を重ねていくことが肝要である。したがって、チャンバー内泥土圧が常に正しく測定されていることが施工管理上極めて重要な要件であり、これら計器の故障に対する備えも不可欠と言える。

一方、泥土圧のチャンバー内分布が泥土の単位体積重量をもとにする深度方向に一定勾配を有する直線分布になっているかどうかは、泥土がチャンバー内に充満していることと、泥土性状を確認する重要な判断材料となる。

掘進中の泥土圧管理値については、前項で述べたとおり、帯水砂質地山の掘削では、泥土圧には、掘進中に泥土化に用いられなかった掘削土の間隙水に相当する余剰水を地山に排出する圧力を作用させる機能が求められる。設定された速度の掘進によって、時間あた

りの掘削地山の土量が決ることから、必然的に掘削土中の間隙水の量が決ってくる

したがって、掘削を一定速度で継続することと、掘削土量当り定量の添加材を注入することから、添加材と置換された掘削土中の間隙水からなる余剰水を排出するための、切羽面積に対する平均的な「必要排水圧力」が定まってくる。良好な掘進状態を実現するためには、土水一体の作用力を地山に与える泥土圧に、この「必要排水圧力」以上の圧力を維持することが求められる。余剰水の地山への排出と地山での浸透を考慮すれば、「必要排水圧力」は、少なくとも、「地山静水压」以上でなくてはならない。さらに、地山からの「水平方向土圧」の作用時の対応も考慮しなければならない。この関係は式(7.1)と式(7.2)で表される。

$$\text{泥土圧} > \text{必要排水圧力} \geq \text{静水压} \quad (7.1)$$

$$\text{ビット圧} + \text{泥土圧} \geq \text{必要排水圧力} + \text{水平方向土圧} \quad (7.2)$$

水平方向土圧は、土被りが大きく、洪積層などの自立性の高い地盤を掘削する場合には、ほとんど作用しない場合もある。しかしながら、このような条件においても、施工に伴う応力の解放により、「地盤の緩み」が生じると、急激な破壊状態に及ぶことがあり、「自立性が高いゆえ、土圧はほぼ考慮しない」との論は、危険側に作用する場合があります。地盤陥没を招いた事例も報告されていることから、泥土圧の設定は、まず「静止土圧＋静水压」を基本とするべきである。

掘進中の泥土圧の管理で注意すべきもう一つの点は、第4章、第6章で示した掘進速度、地山の透水性と泥土圧のバランスによっては、切羽近傍地山の間隙水压と泥土圧が同じになるような状態が発生しうることである。このようなときには、地山に対して泥土圧だけではその水平方向土圧あるいは水平方向有効応力に対抗する圧力を作用させる状態になっていないと考えられ、第4章で示した鈴木の助言による方法等を用いて、ビット圧の作用状況を確認するとともに、地盤変位を最小に抑える施工を求められる施工環境の場合には、推進力を制御して地山の水平方向土圧に対抗する圧力を作用させる状況を作る必要がある。

一方、設定泥土圧を主働土圧、緩み土圧と緩和することを検討する場合には、切羽における地山の応力解放が発生してトンネル周辺地盤に影響を与えていないかどうか確認し、圧力の設定の試行を繰り返して、泥土圧・管理手法と地山変位との関係を確実に把握したのちに、変更の検討を行うことが必要である。特に、このような場合には、余剰水が地山にしっかり排出されているかどうかを地山間隙水压測定によって確認することが重要である。

なお、管理値には、一般に、制御のための余裕値： $\alpha = 200 \sim 500 \text{ kN/m}^2$ 程度を加える場合が多く、施工実績を見ると、余裕値 α は 200 kN/m^2 と設定されていることが多い。この α 値を決定する際は、圧力管理値の主体をなす主働土圧や静水压に対してどの程度の影響を与えるかに留意する必要がある。

一方、この余裕値 α は、一面では、排土量の制御による場合の泥土圧の感度・反応の振れ幅に対応する値としても位置づけられる。実態的にも不均質な地山とマシンの周面摩擦等によるジャッキ伸張の振れなど、管理上不可欠なものとも言える。更に低土被りの場合等のように、管理の基本となる泥土圧が小さい場合には、 α 値の泥土圧に対する割合が大きいくらい、変動幅が大きいことになり、このような管理値の設定では、地山に合ったスムーズな掘進を達成する圧力管理を行えない場合も想定される。

また、緩み土圧を選択した場合には、主働土圧係数を掛けることにより求めた値を泥土圧の設定値としている施工例が通例であるが、地山状況により、泥土圧値が不足する場合があり、緩み土圧を泥土圧の管理値の基本として用いようとする場合はその妥当性の根拠と異常時への備えを明確にしておく必要がある。

掘進停止中の泥土圧管理では、掘進停止に伴う泥土圧の低下の地山への影響を考慮した管理が必要である。掘進停止中には、泥土圧は次第に低下し、長時間の停止においては、静水圧に漸近する。地山変位の抑止の面からは、掘進中の圧力管理方法と同様に、チャンバー内圧力を静止土圧状態に保つことが地山の応力解放を抑える管理となる。掘進停止に伴う泥土圧の低下を泥土の物理特性で補うことも考慮する必要があることは、第5章や(1)泥土性状管理でも述べたとおりであるが、その成果は今後の研究を待つ現状を考慮すれば、他の方法に依らざるを得ない。

掘進停止中で、チャンバー内に塑性流動化した泥土が充満し、その泥土の排土がなければ、この状態で土圧計が示す値が地山から作用する土圧と水圧との合計と解釈することができる。切羽での応力解放を防止することを目的とするならば、この状態が適切であるかを掘進停止中のチャンバー内圧力の変動を監視し、周辺地盤の変位影響を確認することにより、圧力の増加を図る必要度の判断を行い、この繰り返しで適切な泥土圧を維持するように管理を行うことが必要である。

未固結な砂層やバインダー分の少ない砂礫層などにおいては、掘進の際のカッター切削により、切羽近傍が「攪乱」されている可能性があり、そのため、長時間の掘進停止に際しては、泥土圧の低下と相俟って、徐々に地山土砂が泥土中に崩壊し、泥土圧力が異常な増加を示すことがある。このような状態を引き起こさないためにも第6章で示した効果が得られる添加材注入や推進ジャッキの作用による泥土圧の維持が必要となる。

したがって、地盤条件によっては、特に再発進時には、泥土性状の劣化や、泥土と切羽の応力バランスが極めて危険な状態となっている可能性があることに十分な注意が必要である。

(4) 排土量管理

本来、掘削土量と排土量は、体積、重量とも同じであればバランスがとれているものと言えるが、泥土圧シールドの掘進過程においては、所要のチャンバー内泥土の性状を確保するために添加材等を注入し、さらに両者のバランスを制御することによってチャンバー

内泥土を所要の圧力に加圧する。

この掘削過程で掘削土に含まれる間隙水が泥土化に伴う余剰水として地山に排出されることから「掘削土量と添加材注入量の和」と「排土量」とには当然のこととして差が生じる。さらに、先にも述べたように、良好な掘進状態の前提となる所要の性状の泥土にもある状態の幅があり、その状態はこの添加材の量や排出余剰水量によって変化すると考えられる。したがって、この差は地山の物性、泥土の圧力と性状、添加材の種類と注入量によって異なった値となる。

すなわち、掘削土量と排土量の差の制御によって、チャンバー内泥土に圧力を発生させて、さらに、その制御によって、泥土圧を保持する機能を発揮することを考えれば、泥土圧が制御のために設定した余裕値の範囲などのある一定の管理範囲内の圧力に保持されている状態であることが、「掘削土量と排土量の適切なバランス」がとれた状態になっていることを示しているとみなすことができると考える。

したがって、通常は、掘進に伴って刻々と変化する地山の地質特性や初期応力状態により対応条件が変化することから、7.2 で示した良好な掘進状態を想定した地山への作用と地山挙動を念頭に、7.3.1 で示した良好な掘進状態を作るための掘進管理の鍵を的確に踏まえたうえでなければ、掘削土量、添加材量、排土量を、その計測値の変動のみにより定量的に把握して掘進の妥当性を分析・管理しても、必ずしも的確な判断とはなっていない場合があることを認識しなければならない。

ここまで、掘削土量と排土量のバランスについて施工状況を反映した考え方を示したが、管理という観点からは、地山と泥土圧・ビット圧との応力バランスを踏まえ、トライアルによって、所要の泥土圧を確保できる状態を確認して、それに対応する掘削土量と排土量の関係を保つような管理をすることが肝要であるが、排土量管理のもうひとつの重要な事項に排土量の測定の問題をあげることができる。

排土量については、その密度、含水量、重量、体積を精度よく測定し、排土量全数量を確認することが必要であり、そのための装置を備える必要があると考える。

現在、排土量管理は搬送方式に応じて、鋼車、ズリかん、ホッパーを用いた方法、スクリューコンベヤーの回転数、土砂圧送ポンプの作用回数を用いた方法、電磁流量計とγ線密度計を用いた方法で排土重量や体積の測定管理が行われるが、トンネル掘削断面が大きいほど、測定誤差による地山余掘量の増大が懸念されることから、採用にあたっては測定の機構上、あるいは計器上の誤差を考慮した管理基準、管理方法に十分な検討が必要であるとともに、できるだけ早期に測定結果が得られ、次の管理に反映できる体制をとることが大切となる。

5%の測定誤差は、掘削断面積 80m²、リング幅 1.5mの条件では、1 リング掘進あたり 6m³に達する。6m³の過剰な排土の継続が対象地山に与える影響を考慮にいれて必要な精度が得られる測定方法や精度を補完する方法の採用も考慮する必要がある。特に、電磁流量計やガンマ線密度計による測定は、手軽さと簡便さでの適用が進められているが、排土

の管内流速など精度確保のために必要な条件が別途あることにも注意が求められる。

(5) 地山間隙水圧測定の活用

地山間隙水圧の測定は、掘進管理としては、ほとんどの現場で活用されていない。これは、シールド施工区間全域に渡って施工断面近傍に間隙水圧計を一定間隔で設置することが用地、計測スペースの確保、計測コストの関係から困難なためと考えられる。しかしながら、施工管理上重要な場所においては、施工の確実性を期する意味からも地山間隙水圧測定を実施することが求められる。

第4章で示したとおり、良好な掘進状態にある場合には、地山に排出される余剰水によって地山間隙水圧が遠方から上昇することから、この地山間隙水圧の上昇の有無や既存の測定結果との相違から、掘進状態の良否が確認できる。一方、同様に第4章で示した、阪神シールドや福島シールドでの切羽直近での地山の崩れ、緩みに伴うと思われる地山間隙水圧の低下に見られるように、地山が崩れたり、緩んだりした場合には、地山のダイレタンスー効果によって間隙水圧が低下することが知られており、また、地山からのチャンバー内への水の浸入がある場合にも地山間隙水圧の急激な変動が確認されている。このような余剰水の排出や地山の崩れは泥土圧の変化からはなかなか把握できない。また、チャンバー内への水の流入は、一般的には土圧計により泥土圧の低下として検知されるが、掘進中においては泥土圧の変動とあいまって、直ちに浸入を確認することは、通常の管理では容易ではない。したがって、特に掘進開始時で、十分に塑性流動化や圧力保持がなされていない泥土への水の流入があり、それに伴って切羽の安定が損なわれるような場合の地山状況の変化や泥土性状の変化の判定には、地山間隙水圧の測定が有効になる。

7.4 掘進管理の全容とその他の掘進管理情報

7.2 と 7.3 で述べた掘進管理の内容を項目ごとの相関図として掘進中と掘進停止中に分けて示すと、それぞれ、図 7-4、図 7-5 のようになる。

7.4.1 掘進中の管理

掘進中の管理について、図 7-4 をもとに説明すると、次のようになる。

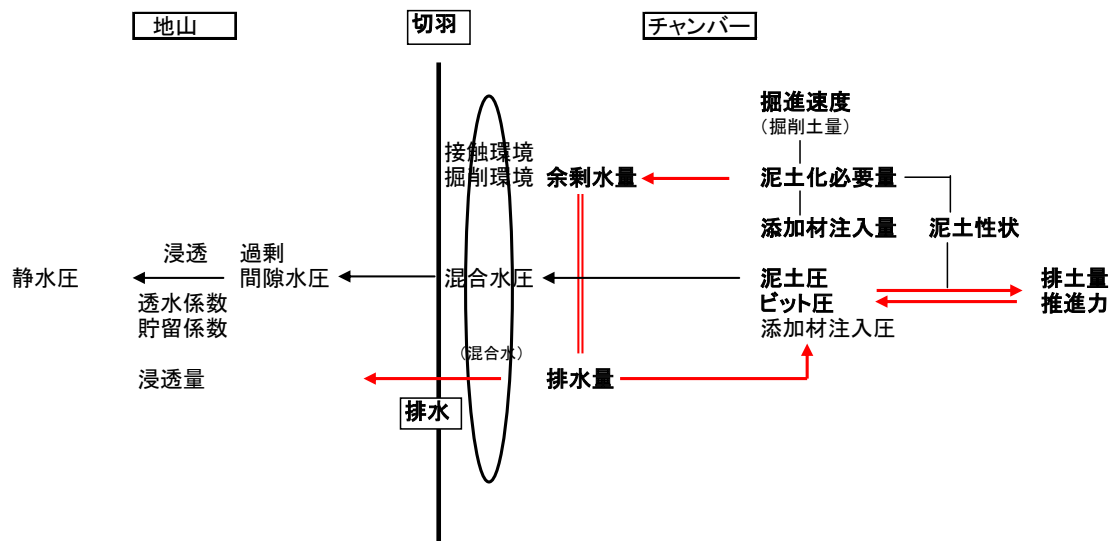


図 7-4 掘進中の管理相関図

- ① 所要の掘進速度を設定する。
- ② 掘進速度が決まれば、地盤調査情報から掘削土量、掘削土中の間隙水量が決まり、それに応じて泥土化に必要な添加材注入量の基本的な量が決まる。ここで決まる地山間隙水量はそのまま地山に排出されるべき余剰水量になる。なお、添加材の選定および注入率の目安については、別途事前に地山土を用いた室内試験等を行っておくことは前述のとおりである。
- ③ 掘進速度に応じた添加材注入を行い、掘削土と攪拌混合して良質の泥土を作る。このとき発生する余剰水を掘進中に継続して地山に排出するのに必要な圧力として泥土圧が決まり、さらに、地山を切削するのに必要なビット圧を加味してシールドの推進力が決まる。このとき、切羽では、掘削土砂、添加材、余剰水が混合した状態（混合水）が生じる。その状態に応じたシールド機と地山の接触環境と掘削状況が発生する。
- ④ このようにして決まった泥土圧は切羽部の混合水の圧力を上昇させ、地山へ余剰水を排出させて、地山の間隙水圧を上昇させるが、泥土圧は常に地山間隙水圧より大きいことが必要である。しかし、時には、地山に発生する過剰間隙水圧と同程度の値になることもあるので、管理に用いる泥土圧の設定にあたっては、地山とシールドの切羽における応力バランスを考慮した値に設定する必要がある。泥土圧と地山過剰間隙水圧との差異についての判断は、地山間隙水圧の計測が行われていない場合には困難であるが、4.4.2で述べた方法等により、ビット圧が地山に作用している程度を把握して、設定した泥土圧が適切かどうか判断することも必要である。
- ⑤ 泥土圧の調節はスクリーコンベヤーの回転数を調節して行う排土量の調節で行う。
- ⑥ 地山への水の排出の状況は、泥土性状や地山間隙水圧の上昇によって確認する。
- ⑦ 泥土のチャンバー内での性状やその充満度は、排土された土の目視や手触りのほか、

チャンバー内の泥土圧分布形状によって判定する。

- ⑧ 泥土圧の変動は、掘進速度、添加材注入圧、泥土性状、余剰水量（排水量）、地山状態によって生じるので、掘進速度、添加材注入圧、泥土性状はもとより、他の掘進管理情報から良好な掘進状態が維持されているか判断する必要がある。

なお、他の掘進管理情報の活用方法については、後述する。

7.4.2 掘進停止中の管理

掘進停止中の管理については、図 7-5 に基づいて説明すると、次のようになる。

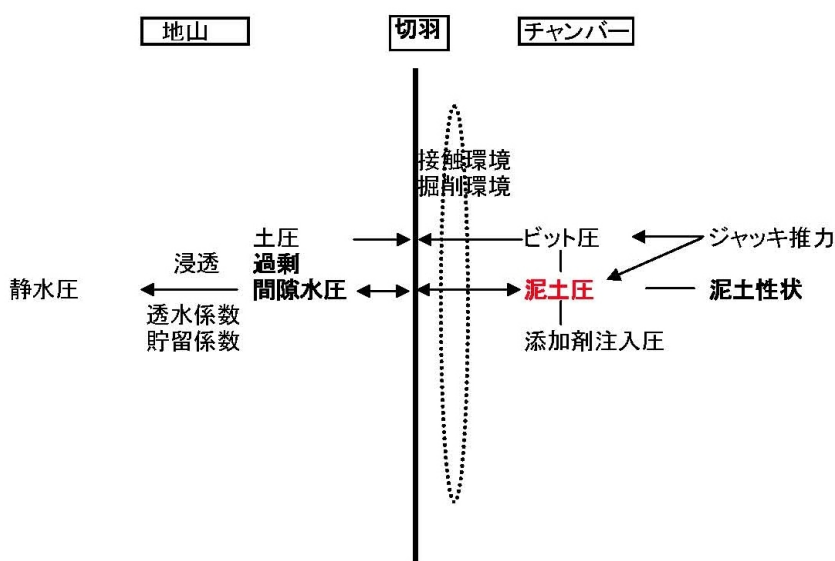


図 7-5 掘進停止中の管理相関図

- ① 掘進停止中は、地山との応力バランスが、泥土圧と地山の土圧、間隙水圧だけの関係になることから、掘進停止時には急激な泥土圧の低下変動を起こさないマシンコントロールが必要である。泥土圧は、シールド機の姿勢制御の影響を大きく受けることは第 4 章で示したが、姿勢の変化や排土の停止と掘進停止が同時でない場合などには人為的な泥土圧低下が発生しやすいので、注意が必要である。掘進停止時の急激な泥土圧の低下と以後の緩やかな泥土圧の低下を、泥土の物理特性で抑える可能性を示したが、物理特性が掘進停止後の泥土圧の低下防止に有利な泥土を作ること心掛けることは重要である。
- ② 掘進停止中の泥土圧の低下に対しては、添加材の注入あるいは、ジャッキ推力の作用によって、その低下を防止することが必要である。このときには、上昇あるいは復元した泥土圧を維持することによって、泥土圧の低下によって解放された地山の有効応力を回復させることもできる。

添加材の注入によって泥土圧の回復を図る場合には、注入量の増大による泥土性状の劣化、悪化に注意が必要である。

7.4.3 その他の掘進管理情報の活用方法

泥土性状、掘進速度、泥土圧、排土量のほかに、掘進管理情報として活用される情報として、カッタートルク、添加材注入圧・量が挙げられる。

カッタートルクは、良好な掘進が行われている場合には、地山を切削するのに必要なトルクと泥土中をカッタースポークや攪拌翼とそれらの支持物が回転するときの抵抗に対するトルクから構成される。そして、泥土性状が適切で、地山の性状に対して適切な掘進速度であれば、一定の変動を伴う定常的な値を示す。したがって、この情報は、泥土の性状と掘進速度の適正状態を確認するための情報として用いられる。特に、第4章のビット圧の存在を確認するときに用いた、詳細な掘進開始時の推進力、泥土圧との関係から地山掘進状況を推定する方法は、適切な掘進状況を確認するためにカッタートルク情報を有効に活用する方法と言える。

また、カッタートルクがあまり小さい状態では、泥土が塑性流動化する性状と言うよりは、液体に近い状態を示していると考えられることから、添加材注入量が多すぎて適切な泥土性状でないことを示す情報として用いられる。一方、カッタートルクが急激に上昇していく変化は、地山の変化や掘進速度の地盤への不適合など、掘進速度の設定上の問題を示すほか、チャンバー内の泥土性状の劣化、固結傾向を示すことから、添加材注入量、攪拌混合、掘進速度と地山状態との不適合を示す情報として活用される。

添加材の注入量、圧は、基本的には、泥土の性状管理の直接的な情報として用いられる。

注入量は、良好な泥土性状を確保するのに必要な量として設定される量であるから、基本的な量よりも多すぎたり、少なすぎる注入量では、泥土性状として適切でない状態が発生することになる。

一方、注入圧は、制御される注入量に応じて現れるものであり、注入環境の状態を示すことで、泥土の圧力や性状、切羽での掘削環境を反映することから、泥土圧に対して一定の関係での圧力状態が望ましいことになる。したがって、泥土性状と密接な関係を有する地山状態、掘進速度、カッタートルク状態、排出される泥土の性状との関連性を考慮して、泥土性状の改善の必要性を判断するための管理情報として用いる。

添加材の注入によって泥土圧の回復を図る場合には、注入量の増大による泥土性状の劣化、悪化に注意が必要である。

7.4.3 その他の掘進管理情報の活用方法

泥土性状、掘進速度、泥土圧、排土量のほかに、掘進管理情報として活用される情報として、カッタートルク、添加材注入圧・量が挙げられる。

カッタートルクは、良好な掘進が行われている場合には、地山を切削するのに必要なトルクと泥土中をカッタースポークや攪拌翼とそれらの支持物が回転するときの抵抗に対するトルクから構成される。そして、泥土性状が適切で、地山の性状に対して適切な掘進速度であれば、一定の変動を伴う定常的な値を示す。したがって、この情報は、泥土の性状と掘進速度の適正状態を確認するための情報として用いられる。特に、第4章のビット圧の存在を確認するときに用いた、詳細な掘進開始時の推進力、泥土圧との関係から地山掘進状況を推定する方法は、適切な掘進状況を確認するためにカッタートルク情報を有効に活用する方法と言える。

また、カッタートルクがあまり小さい状態では、泥土が塑性流動化する性状と言うよりは、液体に近い状態を示していると考えられることから、添加材注入量が多すぎて適切な泥土性状でないことを示す情報として用いられる。一方、カッタートルクが急激に上昇していく変化は、地山の変化や掘進速度の地盤への不適合など、掘進速度の設定上の問題を示すほか、チャンバー内の泥土性状の劣化、固結傾向を示すことから、添加材注入量、攪拌混合、掘進速度と地山状態との不適合を示す情報として活用される。

添加材の注入量、圧は、基本的には、泥土の性状管理の直接的な情報として用いられる。

注入量は、良好な泥土性状を確保するのに必要な量として設定される量であるから、基本的な量よりも多すぎたり、少なすぎる注入量では、泥土性状として適切でない状態が発生することになる。

一方、注入圧は、制御される注入量に応じて現れるものであり、注入環境の状態を示すことで、泥土の圧力や性状、切羽での掘削環境を反映することから、泥土圧に対して一定の関係での圧力状態が望ましいことになる。したがって、泥土性状と密接な関係を有する地山状態、掘進速度、カッタートルク状態、排出される泥土の性状との関連性を考慮して、泥土性状の改善の必要性を判断するための管理情報として用いる。

7.5 具体的な施工管理

7.5.1 円滑な掘進管理の全容

7.4 で述べた掘進管理の全容を施工および施工管理の手順にしたがい整理すると、図 7-6 のようになる。このフローには、7.3 から 7.4 で述べてきた掘進管理の重要事項とその基本的な考え方が、掘進と掘進停止が繰り返される作業サイクルの中で果たす役割と位置づけが示されている。さらに、掘進と掘進停止に伴うシールド側から地山への作用力の変化と地山の反作用による挙動についてもひとつの流れで表し、掘進管理情報のうち、マシン制御に関わる項目に関しては、設定して操作する項目と必然的に決まる項目の情報を分けて考える必要があることも明示している。また、地盤の変位については、その発生原因と関連づけて示されている。

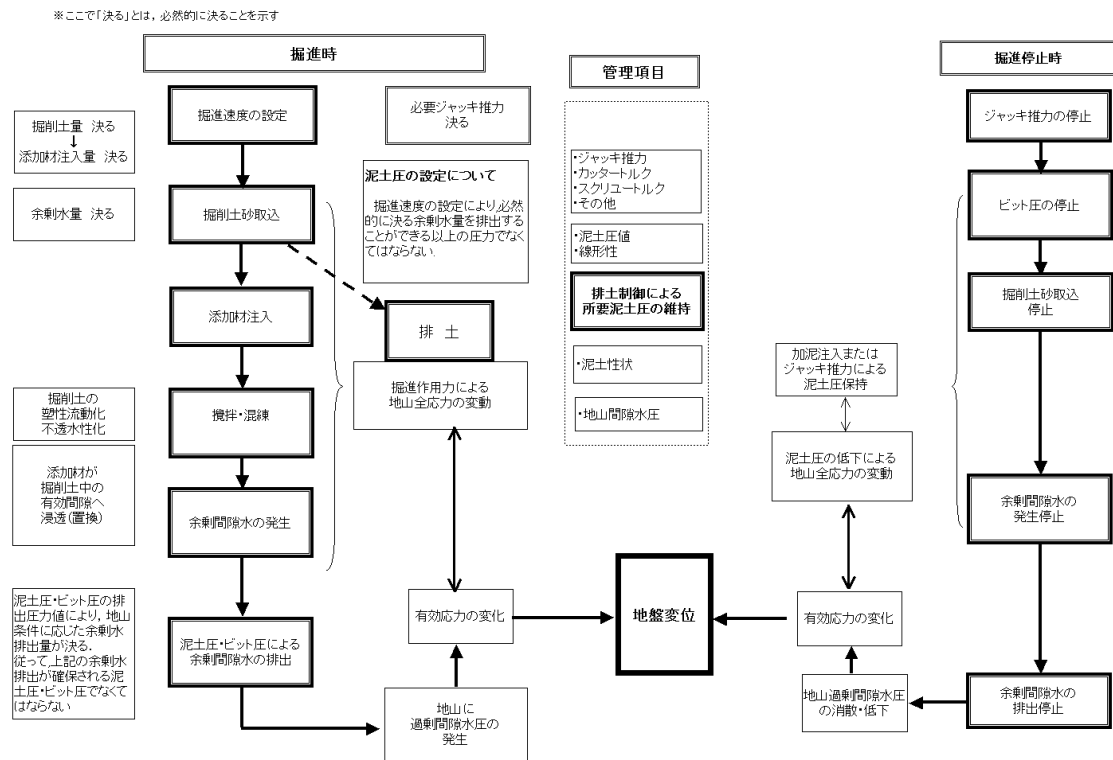


図 7-6 土圧式シールドの掘進管理と地盤変位

シールドの掘進は、掘進と掘進停止の繰り返しであり、リングの数だけ掘進開始がある。この掘進開始時に地山の状況、泥土の性状、掘進速度、添加材注入量、設定泥土圧、排土量が適正であることを確認、あるいは、状況に応じた変更を注意深く行うことが、不測の事態や施工のトラブルを回避する最も有効な方策になりうるものと考え方から、図 7-7 には、掘進開始時の管理フローを示した。

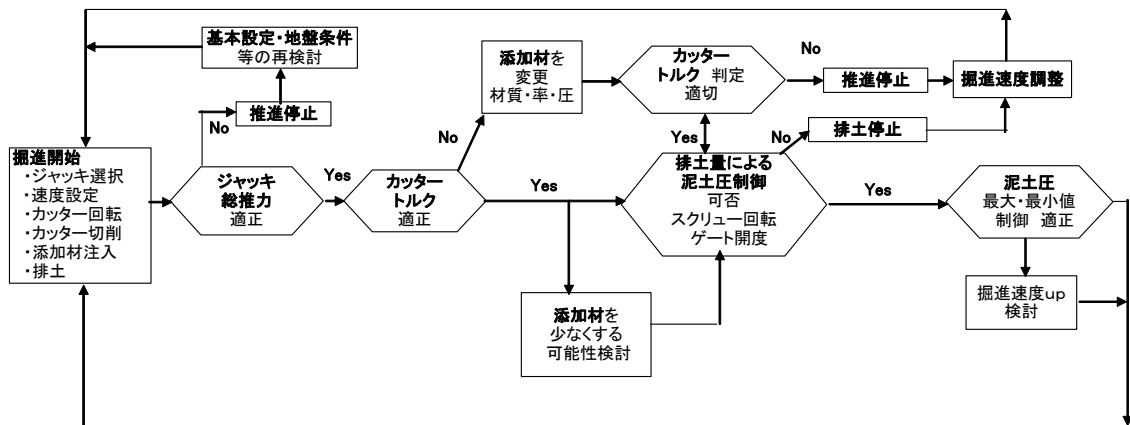


図 7-7 掘進開始時における管理

このフローは、

- 掘進開始で設定したジャッキ推力を作用させて、掘進速度を徐々に上昇させる過程で地山掘削を開始した時点からカッタートルク状況を睨み、泥土の状態、地山の状況を確認する。

設定したジャッキ推力で切削ができなければ、掘進停止をして、原因を究明する。

- カッタートルクに特に問題がなければ、掘進速度に対応した量の排土を開始して発生している泥土圧の変化と排土コントロールの関係を把握して、排土による泥土圧コントロールの可否を判定したのち、泥土圧の変動範囲を確認して、掘進速度を上げていく。

大きなカッタートルクが発生した場合には、添加材の量を変更してカッタートルクの低下を確認して排土による泥土圧制御に戻る。添加材の量を変更してもカッタートルクの低下が図れないときは、掘進停止して、添加材の適否の検討も含めて原因を究明する。

カッタートルクが小さい場合には添加材量を少なくする可能性を検討する。

排土量による泥土圧のコントロールがうまくいかない場合には、排土を停止して、掘進速度を調整する。

という手順を示しており、この手順を掘進が定常状態になる前に行うことを提案する。なお、この手順の中に出てくる「大きな」「小さい」などの相対的な表現は、前のリングまでの掘削実績に対しての評価であり、このような掘進開始時の管理を実施することにより、既存の掘進管理情報を活かし、常に良好な掘進状態を念頭において比較検討を行いながら掘進管理をするという認識を共有して掘進管理が行えるようになることが期待される。

7.5.2 泥土圧上昇時の掘進制御

第4章で示した、瀬古 T（味鋤工区）での陥没事例に見るように、掘進中に泥土圧の上昇が確認された場合の対処方法を誤ったことが原因で異常事態が発生する。泥土圧上昇の原因は、主として、次の2点と考えられる。

- (1) チャンバー内の泥土性状の変化や泥土化が不十分なことによるチャンバー内の土砂移動の停滞（チャンバー内閉塞、固結化傾向）
 - (2) 地山の崩れや緩みの増大や地山そのものの変化による土圧の増大
- この2つの原因に対してはその対処方法が全く異なってくる。

原因が(1)の場合には、所定の性状の泥土ができあがるように泥土化が進むような処置をとる同時に排土を促進してチャンバー内の土砂の移動を促進しなければならない。一方、原因が(2)の場合には、増大した泥土圧を維持したまま掘進速度を調節するとともに、泥土性状を確認しながら地山の崩れや緩みが収まるまで、高めの泥土圧で掘進する必要がある。すなわち、前者は、排土を促進して泥土圧を下げる方向、後者は、排土を押さえて、泥土圧の低下を防ぐ方向の処置をとる必要がある。

したがって、適切な掘進管理のためには、掘進過程でこの泥土圧増大の原因を確認しながら、正しい対処方法を選択していく必要があることになる。この判断を誤れば、地山の崩壊を促進する逆方向の管理対応を選択することになる。

以上の考え方にしたがって、掘進中に泥土圧が増大した場合の具体的な対し手順を示すと、図7-8 のようになる。その考え方を図中の番号に従って説明すると、以下のような

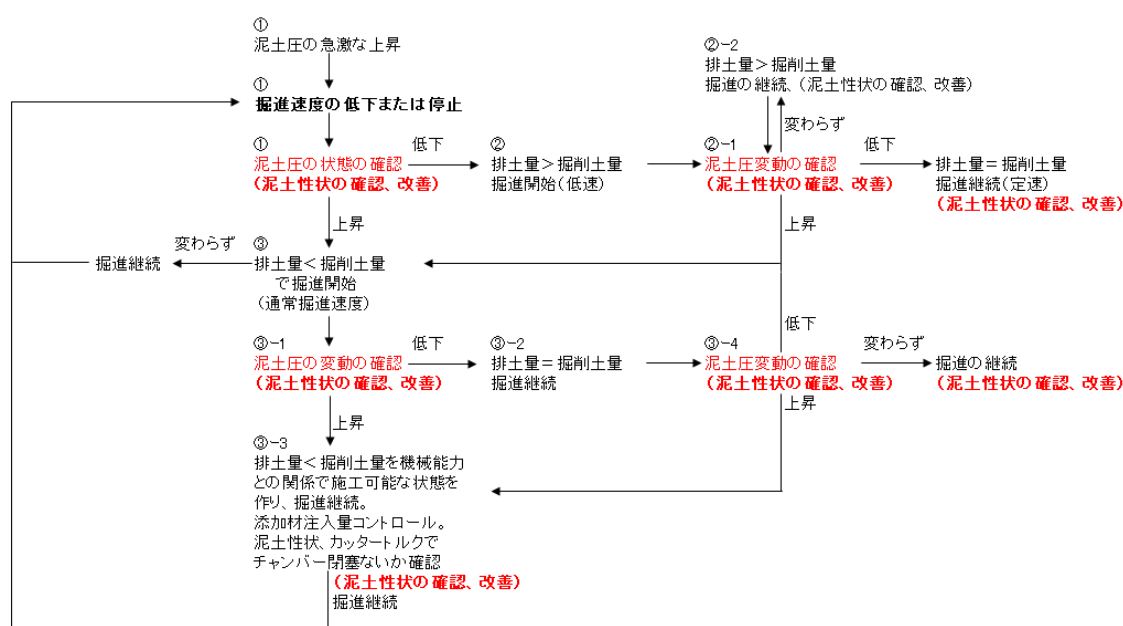


図 7-8 掘進中の泥土圧の急激な上昇に対する具体的な管理

- ① 掘進中に急激な泥土圧の上昇が見られた場合には、まず、掘進速度を低下させ、それに連動して排土量も低下させながら、泥土圧の変動状態を確認する。
- ② 掘進速度を低下させた段階で、泥土圧が低下する場合には、地山の崩れ緩みにより増大した土圧が原因で泥土圧が上昇した可能性は小さいので、排土量を掘削土量より大きめにして、低速掘進を続ける。この場合において掘進中の泥土圧の変動を確認するとともに、泥土の性状が所要の状態にあるようコントロールすることが肝要である。
- ③ 掘進速度を低下させても、上昇したままの泥土圧状態が続くようであれば、地山の崩れや緩みによる土圧が作用してきている可能性があることから、排土量より掘削土量を多めにして通常掘進速度で掘進を開始する。
- ④ このとき、最も重要な事項としてあげられるのは泥土性状の確認であり、泥土が所要の性状であることが必ず必要であり、泥土の性状が良くない状態の場合は、性状改善の処置を必ずとる必要がある。掘進速度に合わせて添加材の注入量を増減させて、さらに、攪拌混合を促進して、泥土性状が所要の状態になるようにする。泥土の性状が所要の状態を確保できていない場合には、地山からの土圧の増大による泥土圧の増大を確認できない。
- ⑤ ②の場合、③の場合においても掘進中の泥土圧の変動を確認するとともに、泥土の性状が所要の状態にあるようコントロールすることが肝要である。
- ②-1 ここで泥土圧の低下が確認された場合には、①の泥土圧の上昇がチャンバー内の状態に起因したものと判断されることから、泥土性状を確認し改善して、所定の掘進速度に戻して掘進を続ける。
泥土圧がさらに上昇する傾向が確認された場合は、泥土圧の増大が地山の崩れや緩みによる土圧の上昇に起因する可能性が大きいことから、③に戻っていく。
- ②-2 泥土圧の低下が見られず、相変わらず上昇した泥土圧の場合には、さらに、排土量を掘削土量より多めにして、泥土性状の確認と改善をしながら、掘進を継続して泥土圧の変動状態を確認して、泥土圧が低下傾向を示すまで継続する。
- ③-1 ③の対応によっては、一般に泥土圧が低下する傾向は見られないと考えられるが、もし、低下が見られた場合には、③-2のように、排土量と掘削土量をほぼ等しい管理状態に戻して掘進を継続して、③-4のように泥土圧変動の確認を行って、掘進を継続するか、③に戻って、さらに掘削土量を増やした掘進とする。
また、③の対応によってさらに、泥土圧が増大する場合には、③-3に示すように、添加材注入量をコントロールして、泥土性状、カッタートルクによって、チャンバー内閉塞がないことを確認しながらマシン能力で可能な限り高い泥土圧を維持した掘進を続け、一定期間の掘進のあと、①に戻って、掘進速度を低下させた状況での泥土圧変動を確認と対応を繰り返す。
このような対処は、③-2の対応によって泥土圧が上昇する傾向が見られた場合に

も同様である。

一方、③の対応によって、泥土圧が上昇も低下もしない場合には、一定期間、同じ状態での掘進を続けたのち、①に戻って、再度、掘進速度を低下させた状態での泥土圧変動を確認して、流れ図に従って繰り返し確認と対応を繰り返す。

このフローの過程で、記述していない重要な情報として、カッタートルクの変動に関する情報がある。カッタートルクは、チャンバー内の泥土性状が固結、閉塞ぎみな状況下では、大きな値となり、泥土性状が良好の場合には、特に小さすぎない適度な値を示す。したがって、泥土性状とチャンバー内の泥土状態を確認する手段として有用といえる。しかしながら、カッタートルクの上昇は、地山の崩れや緩みによって、チャンバー内に掘削土砂が多量に入ってきて、泥土化がうまくいかない場合にも発生すると考えられることから、カッタートルク上昇が一義的に、地山土圧の作用と無関係であるとは言い難い。

なお、切羽近傍の地山間隙水圧の情報が得られている場合には、このフローにおける試行錯誤による泥土圧の急激な上昇原因の探索は軽減できる。これは、泥土圧上昇によっても、地山間隙水圧の上昇が見られない、あるいは、低下する場合には、泥土圧上昇の原因が地山の崩れや緩みによる土圧の作用の可能性が高いものとして判断できる。その理由は、これまでの考察で明らかにしたように、それまでの良好な掘進における地山間隙水圧に比較して、上昇が確認されれば、排土量に比較して掘進速度が大きすぎる（掘削土量が多すぎる）か、チャンバー内の泥土の性状に起因するものと考えることができるからである。

以上のように、泥土圧シールドでは、掘進管理情報として得られたものから掘進の状態を評価するには、いくつかの情報を組み合わせ、試行錯誤が不可欠と言え、単一な流れで管理が行いにくいことは否めない。しかしながら、適切な管理のあり方について述べてきた事項について、的確に管理のあり方についての認識を得ることにより、突発的事象に対しても適切な対応措置が可能となり、異常な地盤変形を阻止することが可能となるものと考ええる。

7.6 掘進管理を考慮したマシンの装備について

7.3～7.5で示した掘進管理の鍵や掘進管理の重要事項を確実に実施するためには、掘進管理を念頭においたシールドマシンの装備が不可欠である。その装備内容について、7.4で示した次の掘進管理項目に沿って述べる。

- ① 泥土性状管理
- ② 泥土圧管理
- ③ 排土量管理
- ④ その他

7.6.1 泥土性状管理

泥土の性状が適切であることは、土圧式シールド施工の大前提であり、まず、適切な性状の泥土を作ることが最大の課題と位置づけられる。

適切な泥土を作るためには、地山にあった種類の添加材の選定はもちろん、添加材を最適な量だけ切羽全体に均等に注入することが求められる。そのため、添加材注入孔はフィッシュテール、カッタースポークにできるだけ均等に数を配置することが望ましく、その注入孔を複数の注入ポンプを用いて多系統の注入ラインで注入が行えるようにして、ひとつの系統で全ての注入孔をカバーすることで発生する注入が入りやすい場所に集中した注入量の偏りを起こさない装備が必要である。

さらに、添加材と掘削土を十分に攪拌混合して均質な泥土を作るための攪拌混合機構が必要である。攪拌混合機構には、必要とされる掘進速度に合わせて掘削土がチャンバー後方に移動する間に泥土が所要の性状を得るための装備として、スポークに取り付けた可動翼、チャンバーに取り付けた固定翼や回転翼（アジテータ）などを泥土の排土口への流れを阻害しないよう適性に配置することが必要となる。

泥土性状の確認のために可動翼に土圧計を設置する試みも成果を上げており、カッタートルクやアジテータの継続的な計測と連動した分析も有効であることから、そのための装備も必要と考える。また、実際の泥土の性状を直接確認するための土砂採取機構や排土状況監視のためのカメラ等の設置により得られる画像の数値分析による性状の確認も今後の技術革新により、望まれる装備となるものと考えられる。

7.6.2 泥土圧管理

泥土圧は、推進ジャッキによりチャンバーの隔壁が前進し、泥土を加圧することによって発生する。この泥土圧が地山に直接作用するためには泥土が求められる性状を有していることは必要である。また、泥土圧が施工中にどのような値となっているかを測定して管

理を実施する必要から、切羽近傍での泥土圧を計測することが望ましく、最近スポーク先端に外周の土圧測定装置が付けられる場合もあることから、回転するスポーク部にチャンバー内泥土圧を計測する機器を装着して、計測位置と連動させて、連続的にシールド断面各点の泥土圧を計測する装備の開発も望まれる。また、直接地山に作用している泥土圧を測定する必要があることから、泥水式シールドに見られる面板の装備は排除されるべきと考える。

現状をふまえると、泥土圧は良好な掘進状態を保つ地山への水の排出を発生させるための作用力であり、掘進状況を確認するための唯一の圧力情報であることから、その測定値が常に必要であり、故障などによる測定値の欠測は絶対に回避しなければならない。また、前述のとおり、チャンバー内の泥土圧分布の状態により泥土のチャンバー内での充満状況や泥土性状も把握可能なことから、土圧計の配置にも注意が必要である。大断面シールドでは、十分な泥土圧管理のためには、少なくとも、土圧計の故障も考慮して主要な土圧計は交換可能なものとし、チャンバー内を上、中、下の3段に分割し、中段には左右2個、上下段にはそれぞれ1個の土圧計の設置が望ましい。

前述のように、掘進停止中の泥土圧低下は地山の有効応力の解放をもたらし、有害な地盤変位を発生させる可能性があることから、その低下を抑止し、所定の泥土圧を維持することが重要である。そのため、チャンバー内圧力保持機構として添加材注入装置や推進ジャッキを用いた制御が行える装備が必要である。

7.6.3 排土量管理

排土量の把握はできるかぎり短い時間単位で行われることが極めて重要であり、トロ・コンベア・パイプ等の輸送方法により、その計測装備は異なってくる。近年、パイプ搬送が多用されているが、円滑な搬送のためには、注水が必要な場合がほとんどであり、他の搬送方式においても、スクリーコンベヤー排土口の直近において、排出土砂を採取する装置を装備して、排土量や密度、含水量、重量、体積を継続的に精度よく計測することが、泥土圧シールド管理の死命を制すると言っても過言ではない。

現状の排土量の測定では誤差を回避することはできないため、その誤差を小さくすることはもちろん、誤差を十分認識した管理も必要であり、採用した排土量測定システムの精度に対する十分な理解とそれを補完する装備が求められる。特に、大断面シールドでは、前述のとおり、誤算による土砂の取り込みすぎ量は大きく、地山によっては、異常事態を引き起こしかねないことから注意を要する。

7.6.4 その他

良好な掘進状態を確保するために、その他の項目として、チャンバー内の固着防止とシ

ールドマシンと地山の摩擦（周面摩擦）の増大防止も必要な要素である。

チャンバー内の固着防止には、除去用の高圧水を噴射できる噴射孔の設置や除去棒など除去のための装置をチャンバー内に挿入するための孔などの設置が必要である。一方、周面摩擦の増大防止のためには、シールドマシン周面に円周方向に滑材を注入する孔を設置することも必要となる。これらの噴射孔、除去孔は、チャンバー内の構造によって、土砂等の固着の発生しやすい部位に合わせた配置が求められる。また、滑材注入孔は切羽での余掘りや地山の小崩落の後埋め等にも利用可能であることから、その設置位置、配置には工夫が求められる。

通常、基本装備間の連動制御システムとして、過去の経験と新技術の付加を踏まえて、様々なシステム構成がなされている。しかしながら、泥土圧シールドの基本原理を十分に踏まえないまま使用した場合には、地盤の異常な変形を人為的に引き起こすことにつながる可能性があることからその使用に際しては、特段の注意が必要である。その「装備間連動システム」についてマシン装備の一部として注意点を述べる。

a) 泥土圧維持と連動した排土制御機構の課題

この機構は、泥土圧がある管理範囲を超えた場合には排土量を多くして泥土圧を下げ、管理範囲より低下した場合には、排土量を減らして泥土圧を上昇させる制御を自動的に行うものである。この機構は一見、極めて妥当かつ優良・不可欠な機構との認識に陥りやすい危険性を秘めている。この機構の盲点は、地山が崩壊傾向にあることに起因して泥土圧が管理範囲を超える上昇傾向を示した場合においても、管理範囲内に設定泥土圧の維持を図ることを目的として、自動的に泥土圧を低下させるために、排土を継続して行うこととなり、掘進量とのバランスを欠いた土量を排土してしまうことになりかねない。

すなわち、地山が崩壊傾向にあるにもかかわらず、更にそれを促進する側に作動するということである。土圧式シールドの基本は、泥土でチャンバー内を充填していることから、異常な泥土圧状態が生じた場合には、排土しなければ地山は崩壊しないという、安全性の高い方式であるにもかかわらず、逆に排土をして、崩壊範囲を拡大し、異常な地盤挙動・崩壊・陥没へと不安全的な方向へと制御していることになることについての認識が掘進管理に携わる者になければならない。泥土圧の変動にはいくつかの異なった原因が考えられ、その原因と地山挙動の関係に対する十分な認識の上に立って掘進管理が行われるべきであり、このような一方向的な制御を自動的にできない状況があることに対する注意が必要である。

b) 掘進速度と排土速度が自由に設定でき、しかもシンクロできる機構の課題

この機構も a) と同様である。前述のとおり、泥土圧の管理の方式として、掘進速度制御と排土量制御があり、それぞれは有効な手法である。常磐道 T における排土量変動に対する泥土圧変動の測定結果を図 7-9 に示す。ここでは排土量に応じて泥土圧が直接変動すると仮定した場合には、排土量の時間当たりの変動を上下対象に投影すると、排土量と泥土圧の変動は概ね一致するものと考えられるが、この図からは概ね 5 分程度の時間のずれ

をもって泥土圧が変動していることがわかる。したがって、前述のとおり、掘進速度に応じて、必要な泥土圧が変動すること、及び時間当りの掘削土量の変動により、泥土圧は敏感に変動するものの、排土量による泥土圧の変動には時間的なずれもあることから、その実態を十分認識した上で使用しなければならない。

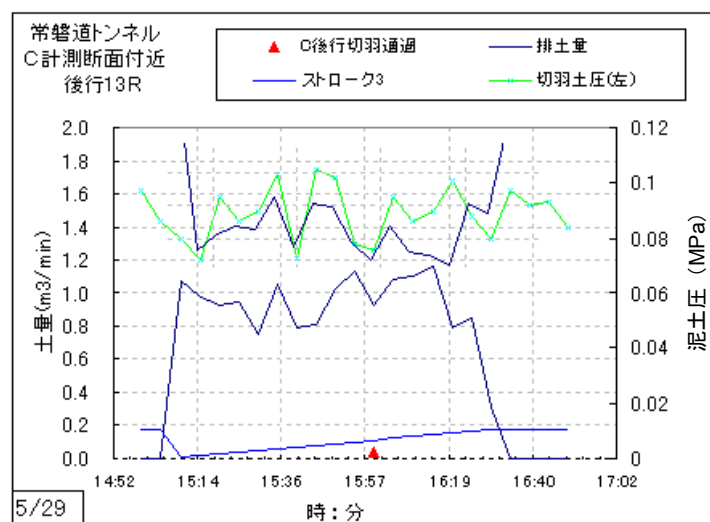


図 7-9 泥土圧と排土量の関係

すなわち、掘進速度と排土量を連動させた場合においても、泥土圧保持が的確に行われない場合には、前述と同様に、地盤の異常な挙動が推測されるにもかかわらず、地山の異常変形のケースを想定しないままの連動制御では、地山崩壊を促進することにつながりかねない機構である。

すなわち、実態的には、速度を一定にして、排土量で制御する。それがうまくいかなければ、一旦速度を低下させた後に一定速度の元での排土量の制御による泥土圧の確保を試みるなど、システムに依存することなく、泥土圧シールドの基本を踏まえた管理を行わなければならない。

特に、施工現場によっては、マシン制御システムとして上記の連動機構を有しているものの、排土量の設定は、責任技術者の指揮の下に、マシンオペレータが、諸掘進データを踏まえて、手動で設定することを基本制御として採用している場合があり、ここにも、泥土圧シールドにおける掘進管理の重要な管理方針が窺える。以上の内容を機械的なマシン装備として整理すると、表 7-1 のようになる。これらの事項は、過去長期にわたる施工の実績に基づいて、すでに標準的な装備となっているものも含まれるが、それぞれ装備の目的と使用上の留意事項を明らかにするとともに、施工に伴う地山挙動を把握して、その結果を施工に的確に反映することが装備の必要性を明確にすると考える。

これにより、装備目的を明確にしたマシンの設計がなされ、その装備間のシステム連動の意図を確実に認識することの必要性を明らかにすることができるものとする。

表 7-1 管理を達成するための主要なマシン装備

管 理	マシン装備	目 的
チャンバー内 泥土圧管理	・泥土圧 発生機構 スポークタイプのカッターヘッド	圧力の地山への円滑な伝達
	・泥土圧 保持機構 添加材注入装置 推進ジャッキ	停止中の圧力低下防止
	・泥土圧 測定機構 土圧計（個数・配置）	チャンバー内泥土圧の線形性の確保確認 天端付近の圧力低下回避
チャンバー内 泥土性状管理	・添加材注入機構 添加材注入装置（配置・系統） 固定翼，回転翼（配置）	掘削土砂中の間隙水との円滑な置換
	・土砂攪拌・混練機構	掘削土砂との攪拌・混練による余剰水の排出
	・泥土採取，泥土性状確認機構	塑性流動性，不透水性，低せん断制の確認
排土量管理 排土量測定機構	スクリーコンベヤーへの泥土の取込 ゲート開度操作機構 掘削土量との照合システム	排出土量のばらつきの回避 過剰排土の防止
排土搬送	パイプ，トロ，ベルトコンベア等に応じた搬送量計測機構	排土量の時間遅れが無い的確な計測
固着防止	除去用高圧噴射孔 除去装置孔	カッターや隔壁部への固着時の除去
間隙水圧管理	地山間隙水圧計測機構	過剰間隙水圧の適切な発生と圧力変動の把握
周面摩擦低減	マシン背面注入機構（滑材注入孔）	推力の切羽への有効な伝達 地山への摩擦せん断力伝播の低減

7.7 結論と今後の課題

本章では、第4章から第6章で明らかになった良好な掘進状態での掘進中、掘進停止中の地山挙動のメカニズムをもとに、泥土圧シールドの施工において、適切な管理を行うための、「掘進管理の鍵」とその鍵を達成するための「重要事項とその管理上の基本的な考え方」、その考え方をもとにした「掘進管理の全容とその施工中の流れ」を示し、さらに、掘進管理を考慮したマシン装備について明らかにした。

特に、帯水地盤においては、シールドの掘進に伴う地山間隙水等の余剰水の排除が確実に行われていることが、「良好な掘進状態の判断指標」の重要なポイントであることを念頭に、その観点から、泥土のあるべき性状や排土量の管理、泥土圧の維持に焦点をあてて、掘進管理とマシン装備について示した。

その結果、泥土性状の重要性の理由が明確になるとともに、掘進速度、泥土圧の施工上の新たな役割、管理泥土圧の意味、設定の考え方、掘進速度と排土量の関係も明確になり、それらの関連や変動を良好な掘進状態で確認される状態を念頭に分析することにより、管理上の要点を示すことができた。

また、地山間隙水压測定は、様々な地山状態、掘進環境の変化を敏感に示す有力な情報と考えられ、掘進管理におけるその有効性についても提示することができた。しかしながら、その施工管理への活用については、測定環境に課題があり、まだ、実施工に直結した管理を実施できる状況にない。今後は、マシンに装備する間隙水压計の開発など、実際の掘進管理への適用に向けた研究が必要と考える。

参考文献

- 1) 齋藤優，山田清臣：泥土圧シールド工法における掘削礫質土の土性改良，土木学会論文集VI，pp.75～87，1998.3
- 2) 阿部和毅，石田喜久雄：泥土圧シールドの切羽安定の研究(その 1)，三井建設技術研究所報告 第18号，pp.273-281，1993

第8章 結論

第1章では、比較的安全な工法として、近年多様な地盤を対象として施工されている泥土圧シールド工法の施工管理に際して、管理技術者により工法の原理の捉え方に差異があり、それを原因として施工の安全性が左右されかねない状況があることを踏まえて、泥土圧シールド工法の基本原理に立ち返り、切羽安定機構のメカニズムを踏まえた安全な施工管理のあるべき方途を提言することを本研究の目的とすることを示し、本論文の構成について述べた。

第2章では、既往の研究と施工記録を基として、シールド施工に伴う地山挙動について、シールドの掘進と停止の過程における地山の隆起と沈下のメカニズムおよび支配的影響を及ぼすシールド施工因子についての知見を示した。

特に、切羽安定機構が異なる泥水式シールド工法と土圧式シールド工法との特長を踏まえて比較して示すことにより、泥土圧シールドの施工に際して解明すべき課題を明らかにした。

さらに、シールド掘進に伴う地山の変位・変形の抑止を図るには、施工管理項目の設定とその「圧力と量」を初期地山応力とバランスさせる掘進管理が重要であること、および技術開発進み機械性能が向上した現状においても適切な「圧力や量」の評価は技術者の経験に頼っている部分が多いことから、定性的管理から理論に基づいた定量的掘進管理手法の確立が必要であることを示した。

第3章では、土圧式シールド工法に分類され、開発から約25年が経過し、最近特に、広範囲に適用されている泥土圧シールド工法の施工管理が、掘進管理を担う技術者個人により工法原理の捉え方に差異が存在しており、それにより施工の安全性が左右されかねない状況があることの原因の根幹を探究するため、シールド工法の開発の歴史を概括するとともに、各工法の実際の施工において解決が必要とされてきた課題について概括した。

その中で、まず泥土圧シールド工法の施工管理は、経験則に頼る部分が多い工法であり、掘進情報の把握～地山挙動の計測～技術者経験の三位一体により成り立つ工法であることを明らかにした。

次に、泥土圧シールド工法に分類される多様な工法の開発が競われた経緯に、切羽安定機構・泥土の役割と必要な性状についての認識を混乱させ、また様々な認識を生み出している一因があるものと確信するに至り、事例に基づき解決すべき問題点を明らかにした。

さらに、泥土圧シールド施工の一般的施工管理手順を示すとともに、泥土の圧力設定、圧力管理、求められる性状について概括して、管理に当る技術者が、明確に認識できる掘進管理のあり方を具体的に解明することが必要であることを示した。

第4章では、現場計測と掘進情報をもとに、地山挙動のメカニズムについて、シールド側から地山への作用力と作用機構を推論し、あわせて、有効応力の原理に従う地山特性の視点から考察して、下記に示す結果を得た。

- ① シールド機から地山への作用は、ジャッキ推進力を源とする泥土圧、ビット圧と添加材注入圧の载荷と除荷である。これらの作用の地山への影響は、地盤特性、作用力の大きさ、地山とカッターの接触環境、カッターの回転、泥土の性質に依存する。
- ② 泥土の性質を決定する鍵は、泥土化のプロセスの着実な達成と泥土化に用いる添加材の性質であり、深度化した研究が求められる。
- ③ 良質な泥土化のもとでの重要な地山挙動は、掘進中のシールドから地山への水の排出と浸透、掘進停止に伴う水の排出の停止と泥土圧の変化である。この水の排出メカニズムの検証と泥土圧の作用機構の解明が重要な課題である。
- ④ 掘削土砂の間隙水や添加材の水で泥土化時の余剰水が、泥土圧とビット圧によって地山に排出される。泥土圧は余剰水の圧力上昇に対して全応力的な作用をする。
- ⑤ 掘進により生じた過剰間隙水圧は、停止によりその圧力を急激に失い、以後周辺地山への浸透による過剰間隙水圧の消散に応じて緩やかに低下する。この間隙水圧の上昇による隆起と低下による沈下挙動は、有効応力の原理に基づいた挙動を示す。なお、間隙水圧の変動は水平変位とも強い相関関係が見られるが、その変位の方向性については更なる研究が必要である。
- ⑥ 地山挙動を推定するにあたっては、切羽における地山側とシールド側の応力バランスの変化を考えることが重要となる。
- ⑦ 掘進停止に伴う推進力の消失による泥土圧の急激な低下とその後の緩やかな低下には、泥土の物理的な特性が関係しているものと考えられる。
- ⑧ 掘進停止中に泥土圧低下を抑止するために実施されるジャッキ圧载荷や添加材注入の作用機構は、泥土圧が上昇して地山に作用するほか、直接的な地山への全応力的な作用として、その目的を果たす。

第5章では、第4章で推論した地山挙動メカニズムの根拠とすべく、①掘進に伴う地山間隙水圧の上昇、②泥土化のプロセスと物理特性、③泥土の土水一体作用、④掘進停止後の泥土圧低下の4点について分析・考察を行い、下記に示す結論を得た。

- ① 掘進時にシールド側から地山切羽での圧力水の排出と、周辺地山への浸透によるバランスに応じて過剰間隙水圧が発生する。
- ② 泥土の特性は、添加材の性質により決まる。その役割は大きい。
- ③ 掘進停止に伴う泥土圧の低下を抑えるために添加材に求められる特性は圧縮性

が小さく、粘性が高いことである。

- ④ 地山に対して土水一体の作用を及ぼす特性を有する泥土を作ることが重要である。
- ⑤ 添加材の注入と泥土圧等により、掘削土に含まれる間隙水を排除し、その間隙を添加材で埋めて土粒子同士を接触状態にする。その泥土化のプロセスを確実に実行することが重要である。
- ⑥ 掘進停止に伴う泥土圧の長期的に続く緩やかな低下は、停止に伴い初期状態に戻ろうとする間隙水压や土圧からの受動的な圧力に起因する挙動と、ジャッキ圧力が除荷されることによる物理特性に起因する挙動の両方が複合した挙動であり、泥土化に使われる添加材の性質が重要な要素となる。

第6章では、泥土圧シールドの施工時における切羽の保持状態の良否の判定についての考え方を明らかにするため、掘進中と掘進停止中の切羽における応力バランスについて考察した。

地山の挙動は有効応力の原理に従うこと、良質な泥土の土水一体の挙動特性を持つことの2つを前提として、加えて地山への圧力排水とその浸透を考慮して、施工過程における地山への作用を分析し、それに対する地山の応答を考察した。さらに掘進停止中に泥土圧維持を目的に実施される対応策の適否について検討した。

ここでの考察により得られたことをまとめると次のようになる。

- ① 切羽における応力バランスを、シールドからの作用とそれに対する地山のリアクションとして考察すると、掘進時に掘削土に含まれる間隙水と添加材の余剰水が切羽におけるビット圧、添加材注入圧と一体となった泥土圧によって地山に排出される現象、地山の間隙水压と有効応力が増減する現象、掘進停止中の切羽での作用力の低下に伴う地山の間隙水压の低下と有効応力低下のメカニズム、掘進停止中の添加材注入やシールドジャッキの再加圧の作用メカニズムとその作用特性が、概ね矛盾無く説明できること
- ② 適切な泥土を用い、泥土圧を地山の初期応力状態以上で施工管理を行えば、掘進中も掘進停止中も切羽における有効応力の初期応力状態からの低下を有効に防止できるメカニズムが機能していること
- ③ 発生する地山挙動は、作用力の変化と泥土の性質の分析から、そのメカニズムを説明できること
- ④ 作用が地山に与える影響を一般的に類推することが可能となり、施工管理方法の良否が評価できる手法になりうること
- ⑤ 実施工における施工のトラブル原因の究明や施工の改善効果が予測でき、適切な施工方法や施工管理方法の選択が可能になること

- ⑤ 本手法は、泥水式シールドにおける切羽安定について、泥膜を介した泥水圧の作用に加えて、切羽付近の地山透水係数と泥水の連続的な浸透の寄与について説明できると予見されること

第7章では、ここまでの研究から、帯水地盤においては、掘進に伴う地山間隙水等の余剰水の排除が確実に行われていることが、「良好な掘進状態の判断指標」の重要なポイントであることが明らかになった。

この観点から、掘進と掘進停止中の地山挙動のメカニズムをもとに、泥土のあるべき性状や排土量の管理、泥土圧の維持に焦点をあてて、「掘進管理の鍵とその鍵を達成するための基本的な考え方」、それをもとにした「掘進管理の全容とその施工中の流れ」を提案し、合わせて必要なマシン装備について示した。

特に、泥土性状の重要性の理由、掘進速度と泥土圧の施工上の意味と役割、掘進速度と排土量の関係も明確になり、管理上の要点を示すことができた。

なお、地山間隙水圧の変動は地山状態、掘進環境の変化を敏感に示す有力な情報と考え、その計測の掘進管理での有効性についても提示した。

しかしながら、その定量的管理指標が未解明であり、実施工において活用できる状況にないのが実情である。今後は、マシンに装備する間隙水圧計の開発や計測情報の集積などを重ねて、実際の掘進管理への適用に向けた研究が必要と考える。

謝辞

筆者は、1973年に日本鉄道建設公団に入社以来、30年余の間、主として都市トンネルの設計施工に従事してまいりました。

NATMが日本で広まりかけた1976年頃に、大学時代に作成した有限要素法橋梁解析プログラムをトンネル掘削プログラムに変身させたものの、実態とは程遠い解析結果を得て、何ヶ月も改良に取り組んだのがトンネル設計の最初でありました。

シールドトンネルとの直接の出会いには片福連絡線の工事であり、シールド工法の選択に際して、土圧式シールドの切羽安定メカニズムが判り難く、比較的理解が容易であることに加えて、高水圧条件等を勘案して泥水式シールドを選定した記憶があります。

その後、京都東西線では泥土圧シールド工法を経験しました。泥水式より安心感を持って管理に当たったものの、天端を少し空ける「すかし掘り」が当然と思い込むなど、今となっては危ない限りでありました。

近年、土圧式シールド工法は、様々な形状や形式のマシンが開発されて、浅層や深層において広範囲に採用されているところではありますが、施工管理が原因となって地盤の異常変形や掘進トラブルが生じた事例が時折報告されています。

本研究は、これらの状況を踏まえて、「土圧式シールド工法の基本原理」に立ち戻り、帯水性砂質地盤での切羽部で生じる地山挙動と応力バランスのメカニズムに着目して、より安全な掘進管理のあり方についての知見を得ることを目的としたものであります。

研究を進めるにあたりましては、京都大学大学院工学研究科 田村武教授には長期にわたり懇切丁寧な御指導と励ましをいただきますとともに、論文の構成、内容、とりまとめに際しましては、細部にわたり貴重な御助言を賜りましたことにつきまして、衷心より感謝し、御礼申し上げます。

また、京都大学大学院工学研究科 岡二三生教授には、地山挙動の分析につきまして、種々御指導をいただきましたことについて、深く感謝いたします。さらに、京都大学大学院工学研究科 家村浩和教授、同朝倉俊弘教授、国際融合創造センター 木村亮教授からは、有益な御指導と御助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げる次第であります。

論文作成の機会を与えていただきますとともに、幾度となく挫折しかかる度に励まし、指導をいただきました鉄道建設・運輸施設整備支援機構副理事長 岡崎準氏には、有難く、深く感謝申し上げます。

さらに、論文執筆の当初から細部にわたり絶大な御協力いただきました、鉄道建設・運輸施設整備支援機構 木村宏氏、同神田大氏、ならびに地域地盤環境研究所 小山幸則氏、同水原勝由氏には、心から感謝申し上げます。

また、株式会社奥村組 岸本章二氏，同増井仁氏からは施工情報の整理等につきまして多くの御協力をいただき，大豊建設株式会社 須賀武氏，同加島豊氏からは，泥土加圧式シールドの開発に関する貴重な経験を教えていただきました．有難く感謝申し上げます．

あわせて，本論文の完成に至るまでの間，御支援，御協力をいただきました多くの方々に，この場をお借りして感謝申し上げますとともに，本研究がシールド施工管理技術の発展の一助になれば望外の喜びであります．

最後に，長期間に亘る論文執筆の取り組みに際して，温かく見守り，時として励ましてくれた 妻陽子に，深甚なる感謝の意を表して，本論文を捧げます．